

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM)
SERBEST ELEKTRON LAZERİ İÇİN ELEKTRON DEMET
HATTI TASARIMI VE DEMET PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

Mert ŞEKERCİ

**Danışman
Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2013**

© 2013 [Mert ŞEKERCİ]

TEZ ONAYI

Mert ŞEKERCİ tarafından hazırlanan "Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Serbest Elektron Lazeri için Elektron Demet Hattı Tasarımı ve Demet Parametrelerinin Belirlenmesi" adlı tez çalışması aŐağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak başarı ile savunulmuŐtur.

Danışman

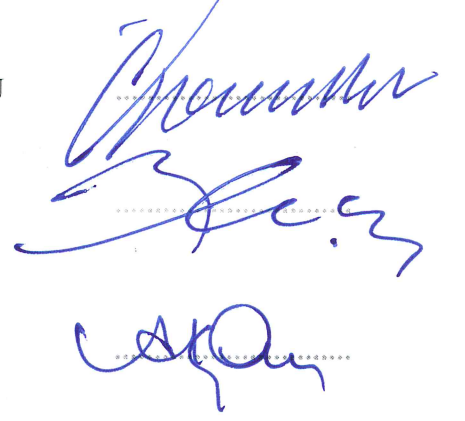
Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU
Süleyman Demirel Üniversitesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Abdullah Kaplan
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mert ŞEKERCİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ÖZETLERİ	3
3.SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ.....	11
3.1. SEL Çalışma Prensipleri.....	11
3.2. SEL Tipleri	12
3.3. SEL Fiziği	15
3.3.1. Hızlandırıcı içerisindeki elektron demetinin ışınma gücü, ışınma kazanç ve kayıpları.....	15
3.3.2. Salındırıcı içerisindeki elektron demetinin hareket denklemi.....	18
3.3.3. Elektron demeti ile salındırıcı arasında etkileşim	21
3.4. SEL Uygulama Alanları	26
3.4.1. SEL biyoloji ve medikal uygulamaları.....	27
3.4.2. SEL kimya uygulamaları.....	27
3.4.3. SEL nanoteknoloji uygulamaları.....	28
3.4.4. SEL malzeme bilimi uygulamaları.....	28
3.4.5. SEL fizik uygulamaları	28
3.4.5.1. Yoğun madde fiziği uygulamaları	28
3.4.5.2. SEL plazma fiziği uygulamaları.....	29
3.4.5.3. SEL nükleer fizik uygulamaları.....	29
3.4.5.4. SEL-çekirdek çarpıştırıcıları	30
3.4.5.5. SEL savunma sanayi uygulamaları	31
4.ARAŞTIRMA BULGULARI	32
4.1. TARLA SEL Demet Hattı Ana Donanımları.....	32
4.1.1. TARLA elektron tabancası.....	32
4.1.2. TARLA paketleyiciler.....	35
4.1.3. TARLA hızlandırıcılar	37
4.1.4. TARLA salındırıcılar	40
4.1.5. TARLA optik kavite.....	43
4.1.6. TARLA demet durdurucu	47
4.2. TARLA SEL Demet Hattı Yardımcı Donanımlar.....	48
4.2.1. TARLA Vakum sistemi	48
4.2.2. TARLA güç sistemleri	50
4.2.3. TARLA soğutma sistemleri	51
4.2.4. TARLA diyagnostik.....	52
4.2.5. TARLA kontrol sistemi.....	54
4.3. TARLA SEL Parametreleri.....	55
4.3.1. TARLA SEL dalga boyu.....	56
4.3.2. TARLA elektron demeti normalize yayılım (emittance)	57
4.3.3. TALA SEL enerjisi ve gücü.....	59

4.3.4. TARLA pik paketçik akımı, ortalama akım ve paketçik zaman yapısı	61
4.3.5. TARLA SEL akı, parlaklık ve aydınlık değerleri	62
4.3.6. TARLA SEL koherentlik	64
5.TARTIŞMA VE SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	89

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TÜRK HIZLANDIRICI MERKEZİ (THM) SERBEST ELEKTRON LAZERİ İÇİN ELEKTRON DEMET HATTI TASARIMI VE DEMET PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Mert ŞEKERCİ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

Bu tez çalışmasında, hızlandırıcı fiziği ve bu alanla ilişkili pek çok bilim dalındaki çalışmaların yapılabilmesine olanak sağlayacak olan, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) kapsamında TARLA (T.A.R.L.A. - Turkish Acceleration and Radiation Laboratory in Ankara) tesisinde kurulacak olan serbest elektron lazeri için elektron demet hattı (özellikle enjektör bölümü) tasarımı yapılarak demet parametreleri hesaplanmıştır.

Kaynak özetleri kısmında ışınım kaynakları hakkında tarihi gelişim süreçleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Dördüncü nesil ışınım kaynakları olarak da adlandırılan serbest elektron lazerlerinin genel özellikleri ve çalışma prensipleri, tipleri, ışınım elde edilene kadar olan süreçte gerçekleşen olayların fiziksel incelemeleri ayrı başlıklar olarak Serbest Elektron Lazerleri başlığı altında sunulmuştur.

Çalışmanın temelini ise, THM serbest elektron lazeri için kurulması planlanan elektron demet hattı tasarımının belirlenmesi ve incelenmesi ile tesisin bölgemizdeki en gelişmiş ışınımın üretilmesine olanak sağlayacak olan demet parametrelerinin belirlenmesi oluşturmaktadır.

Bu amaçla, demet hattı tasarımında ana donanımlar olarak gösterilen elektron tabancası, paketleyiciler, hızlandırıcı, salındırıcı, optik kavite ve demet durdurucu ile yardımcı donanımlar olarak gösterilen vakum, güç, soğutma, tanılama ve kontrol sistemleri detaylıca anlatılmış ve kurulacak olan serbest elektron lazerindeki sistemlerin özellikleri araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

TARLA tesisi Serbest Elektron Lazeri için dalga boyu, enerji ve güç, normalize yayılım, pik paketçik akımı, ortalama akım ve paketçik zaman yapısı, akı, parlaklık ve aydınlık ile koherentlik parametreleri hesaplanarak tartışma ve sonuç bölümünde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Türk Hızlandırıcı Merkezi, TARLA tesisi, serbest elektron lazeri, demet hattı, demet parametreleri.

2013, 89 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGN OF ELECTRON BEAM LINE AND DETERMINATION OF BEAM PARAMETERS FOR TURKISH ACCELERATOR CENTER (TAC) FREE ELECTRON LASER

Mert ŐEKERCI

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Physics**

Supervisor: Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

In this thesis, design of electron beam line (especially injector part) and calculation of beam parameters have been done for the free-electron laser which is in the building process in the facility of TARLA (T.A.R.L.A. - Turkish Acceleration and Radiation Laboratory in Ankara) within the Turkish Accelerator Center (TAC) project which will provide facilities to perform the studies about acceleration physics and lots of discipline related about that area.

Information related about the historical development processes of the radiation sources was given in the literature summary. General properties and working principles, types and also physical examinations of the events until the radiation is generated for the free-electron lasers which is also named as fourth generation radiation sources were given under independent titles in Free Electron Lasers section.

Determination and examination of the beam line of free-electron laser that is planned to build for TAC and also determination of the beam parameters which will lead the facility to produce the most advanced radiation in the region were the basis of the studies.

For this purpose, electron gun, bunchers, accelerators, undulators, optical cavity and dump sections as the main hardware of beam line design and also vacuum, power, cooling, diagnostic and control sections as the auxiliary hardware of the beam line design were described in detail and the specifications of the building free-electron laser was mentioned under the research findings section.

Calculations for the beam parameters of wavelength, energy and power, emittance, peak current, average current and time structure of the bunches, flux, brightness, brilliance and coherency have been done and the results of those calculations were given under the results and discussions section.

Keywords: Turkish Accelerator Center, TARLA facility, free-electron laser, beam line, beam parameters.

2013, 89 pages

TEŞEKKÜR

Sadece akademik hayatla sınırlı kalmayıp, sosyal hayatta da karşılaştığım sıkıntı ve zorlukları aşmamda bana yardımcı olan, sabırla bana katlanarak her alanda bilgi ve tecrübesiyle doğru yolu gösteren, hatalarımı ve yanlışlarımı öğreterek düzelten değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Suat ÖZKORUCUKLU'ya yürekten teşekkür ederim.

Lisans öğrenimim boyunca bana sabırla katlanarak beni yönlendiren, çok değerli Sayın Hocam Doç. Dr. Haluk DENİZLİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın benzetim aşamasında kullanılan kodları derleyen ve benzetim programının kullanımı konusunda bilgi birikimini esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY'a yürekten teşekkür ederim.

Ayrıca Süleyman Demirel Üniversitesi Fizik Bölümü'nde göreve başladığım günden beri yanımda olup, tecrübelerini esirgemedi paylaşan değerli hocalarıma, mesai ve çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

3403-YL1-12 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü yöneticilerine ve çalışanlarına ayrıca teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında ismi geçen ve ülkemizde ilk, bölgemizde ise en gelişmiş özelliklere sahip olacak olan süperiletken elektron hızlandırıcılarına dayalı serbest elektron lazerinin inşa edildiği DPT2006K-120470 kodlu "Türk Hızlandırıcı Merkezi" konulu YUUP projesi ve TARLA alt projesi yöneticilerine ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında olduğu gibi; tezimin de her aşamasında, karşılaştığım her engelde, her sıkıntıda, maddi ve manevi tüm zorluklarda yanımda olan; onlara olan saygımı ve sevgimi anlatmaya kelimelerin yetemeyeceği, biricik aileme; anneme, babama ve kardeşime sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Mert ŞEKERCİ
ISPARTA, 2013

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Normal ışık ve lazer ışını	3
Şekil 2.2. Ticari amaçla kullanılan lazerlerin dalga boyları.....	5
Şekil 2.3. Eğici, zigzaglayıcı ve salındırıcı mıknatıslar ile SEL'den elde edilen ışınımalar	7
Şekil 2.4. Işınım parlaklık değerlerinin yıllara göre evrimi	9
Şekil 3.1. Salındırıcı yapısının detaylı gösterimi	11
Şekil 3.2. Elektron paketçikleri ile elektromanyetik alan arasındaki etkileşim ..	12
Şekil 3.3. Yükselteç SEL	13
Şekil 3.4. Osilatör SEL	14
Şekil 3.5. SASE SEL.....	14
Şekil 3.6. Sapma açısı θ 'nın gösterimi.....	20
Şekil 3.7. Salındırıcı giriş ve çıkışında elektron-lazer etkileşimlerinin sonuçları	25
Şekil 4.1. Termiyonik elektron tabancası şematik gösterimi	34
Şekil 4.2. Spring-8 SCSS termiyonik elektron tabancası diyagramı	34
Şekil 4.3. Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar	36
Şekil 4.4. 9 hücreli süper iletken Nb kaviteeler	38
Şekil 4.5. Çift oyuklu RF hızlandırıcı modül.....	40
Şekil 4.6. Salındırıcı bileşenleri	41
Şekil 4.7. Salındırıcı fotoğrafları.....	42
Şekil 4.8. Düzlemsel ve sarmal salındırıcı dizilimleri	42
Şekil 4.9. TARLA tesisi salındırıcı kısımları	43
Şekil 4.10. Optik kavite sistemi	44
Şekil 4.11. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi.....	46
Şekil 4.12. Elektronların paketçik içindeki hareketi	58
Şekil 4.13. Elektron demeti ve foton demeti yayılım alanları.....	59
Şekil 4.14. Kararlı ve kararsız durumların şematik gösterimi	65
Şekil 5.1. THM TARLA SEL demet elemanları ve şematik gösterimi	67
Şekil 5.2. THM SEL enjektör hattı tasarımı	69
Şekil 5.3. THM SEL enjektör hattı genel görünümü	70
Şekil 5.4. $X_n - Z$, $Y_n - Z$, $Z_n - Z$ grafiği	73
Şekil 5.5. $X_n - Z$, $Y_n - Z$, $Z_n - Z$ grafiği	74
Şekil 5.6. $X_{rms} - Z$ ve $Y_{rms} - Z$ grafiği	75
Şekil 5.7. $Z_{rms} - Z$ grafiği	76
Şekil 5.8. Ortalama enerji $kE - Z$ grafiği.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. SEL üretiminde kullanılan hızlandırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri	37
Çizelge 4.2. TARLA Salındırıcı Parametreleri	43
Çizelge 4.3. Farklı spektral bölgeler için SEL dalga boyu ve enerji aralıkları ...	57
Çizelge 5.1. TARLA beklenen elektron demet parametreleri.....	70
Çizelge 5.2. TARLA beklenen ışınım parametreleri	71
Çizelge 5.3. Demet hattı elemanları benzetim değerleri	78

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BL1	Beam Line 1 (Demet Hattı 1)
BL2	Beam Line 2 (Demet Hattı 2)
BLM	Beam Loss Monitor
BPM	Beam Position Monitor
CEA	Commissariat à l'énergie Atomique et aux énergies Alternatives
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CTR	Coherent Transition Radiation
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
ELBE	Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance
EPICS	Experimental Physics and Industrial Control System
FB	Fundamental Buncher (Ana Paketleyici)
FCT	Fast Current Transformator
FEL	Free Electron Laser
FNAL	Fermi National Accelerator Laboratory
FZD	Forschung Zentrum Dresden
HERA	Hadron-Electron Ring Accelerator
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf
ICT	Integrated Current Transformator
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
IP	İyon Pompası
LANL	Los Alamos National Laboratory
LCH	Large Hadron Collider
NCW	Non-Conductive Water
NI	Normal İletken
NSF	Nükleer Spektroskopik Floresans
OTR	Optical Transition Radiation
RF	Radio Frequency (Radyo Frekansı)
RHIC	Relativistic Heavy Ion Collider
SASE	Self-Amplified Stimulated Emission
SEL	Serbest Elektron Lazeri
SFG	Sum Frequency Generation
SHB	Sub Harmonic Buncher (Alt Harmonik Paketleyici)
SI	Sinkrotron Işınımı
Sİ	Süper İletken
SSPA	Solid State Power Amplifier
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
TMP	Turbo Moleküler Pompa
VUV	Vacuum Ultra Violet
X-SEL	X-Işını Serbest Elektron Lazeri

1. GİRİŞ

Bilim insanları, zamanın başlangıcından beri, sürekli olarak evrenin ve hayatın detaylarını daha iyi anlayıp kavramak için deneyler ve analizler yaparak sürekli çalışmışlardır. Hangi disiplin olursa olsun her daim karşılaşılan zorluklar bilim insanlarını daha ileri hedeflere ulaşma isteğinden alı koyamamış, bunun sonucunda elde edilen bilimsel veriler ve teknolojik gelişmeler birbirlerini tetikleyerek başarılı sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. 21. yüzyılın ulaşılan en önemli teknolojilerinden birisi de dördüncü nesil ışınım kaynakları olarak da adlandırılan Serbest Elektron Lazerleri (SEL)'dir.

SEL'lerde ışıma; yüksek enerjiye sahip elektronların, rölativistik hızlarda hareket ederlerken salındırıcı ismi verilen ve bir ana eksen üzerinde zıt kutuplu mıknatısların eşli dizilimleri ile oluşturulan yapı içerisinde geçmeleri sonucunda, enerjilerinin bir kısmını ışıma yoluyla optik kavite ortamına aktarmaları sonucunda elde edilir (Wiedemann, 1993).

Buna karşın geleneksel lazerlerde ise, atomlara bağlı elektronlar, bir üst enerji seviyesine geçebilecekleri minimum enerji ile uyarılarak bu enerji seviyesine geçmeleri sağlanır. Fakat uyarılan bu elektronların sahip oldukları enerjileri, bu enerji seviyesinde kalmalarına veya serbest hale geçmelerine yeterli olmadığından, bu enerjilerini ışıma yoluyla atarak eski enerji seviyelerine dönerler. Bu sayede bir lazer ışınımı elde edilmiş olmaktadır (Gordon, 1959).

Bu çalışma; ülkemizin ilk, modern ve dünya çapındaki benzerleri ile rekabet edebilecek düzeye sahip tesisi olan, Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi kapsamında inşa edilmesi planlanan serbest elektron lazeri TARLA (Turkish Acceleration and Radiation Laboratory at Ankara) tesisi için gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı; ülkemizin ilk, bölgemizin ise en gelişmiş serbest elektron lazeri ışınımı üretebilme amacını taşıyan SEL'in hayata geçirilmesi aşamasında, bel kemiğini oluşturacak olan elektron demet hattının tasarımı ve demet parametrelerinin belirlenmesi olarak tanımlanmıştır.

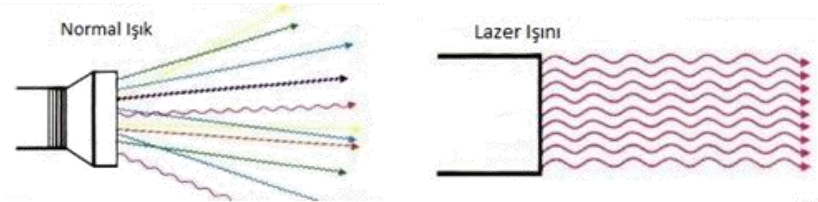
Bu amaç doğrultusunda, bir serbest elektron lazerinin; işleyişinin anlaşılması, çalışma prensibi, tipleri ve uygulama alanları ile ışınım üretilmesi sürecinde elektronların üretildiği elektron tabancasından ışınımın üretilmesi ve elektronların durdurulmasına kadar kullanılacak olan ana ve yardımcı donanımların tayini ve özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca, oluşturulan ışınımın karakteristik özelliklerinin hesaplanmasına yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde, lazerlerin ve sonrasında geliştirilen ışınım kaynaklarının tarihsel gelişim süreçleri anlatılarak, literatür bilgileri aktarılmıştır. Takip eden bölümde ise SEL'lerin çalışma prensipleri, tipleri ve fiziği hakkında bilgiler verilmiş, aktif olarak kullanıldıkları uygulama alanları örneklerle açıklanmıştır. Çalışmanın en önemli kısmında ise, SEL demet hattı tasarımında kullanılan ve ışınım üretilmesinde en önemli rolü üstlenen ana donanım elemanları ve TARLA SEL'in bu ana donanımlar yönünden sahip olduğu özellikler aktarılmıştır. Ayrıca, en az ana donanım elemanları kadar önemli olan ve SEL sisteminin sorunsuz ve verimli çalışmasını sağlayan yardımcı donanım elemanları hakkında detaylar verilmiştir. Daha sonra, SEL parametreleri tanımlanmış, açıklanmış ve tesisin sahip olacağı demet parametrelerinin sayısal değerleri hesaplanarak verilmiştir. Çalışmanın sonuç kısmında ise, demet hattı tasarımının (özellikle enjektör hattı) nihai şekli gösterilmiş ve SEL parametreleri sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

“Uyarılmış Işıma ile Kuvvetlendirilmiş Işık” anlamına gelen “Lazer” kelimesi, dilimize İngilizce açılımı “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” olan “Laser” kelimesinden uyarlanmıştır. En temel tanımı ile bir lazer, fotonların uyumlu bir hüzmeye şekline girmesini ve oluşan bu ışınımın dışarı alınmasını sağlayan optik bir cihazdır (Gordon, 1959).

Günümüzde; bilim, savunma, sanayi, tıp ve ticari amaçlarla kullanılan pek çok lazer çeşidi bulunmaktadır. Bu anlamda pek çok alanda yaygın olan geleneksel lazerler hakkındaki bilinen ilk çalışmaların; 1958 yılında Rus bilim adamları N. Basov ve arkadaşları tarafından başlatıldığını, fakat görünür ışıkta puls lazerini yani ilk modern lazeri 1960 yılında Amerikan fizikçi T. H. Maiman tarafından yapıldığı bilinmektedir (Maiman, 1960). Görünür ışık, farklı dalga boyu, faz ve frekans değerlerine sahip dalgalardan oluşmakta iken, lazerler yüksek genlikli, birbirine paralel, aynı faz değerine sahip ve neredeyse tamamı birbirine paralel olan tek renkli (monokromatik) ve eş evreli (koherent) ışımaya oluştururlar (Siegman, 1986). Şekil 2.1’de normal ışık ve lazer ışını arasındaki fark temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Normal ışık ve lazer ışını

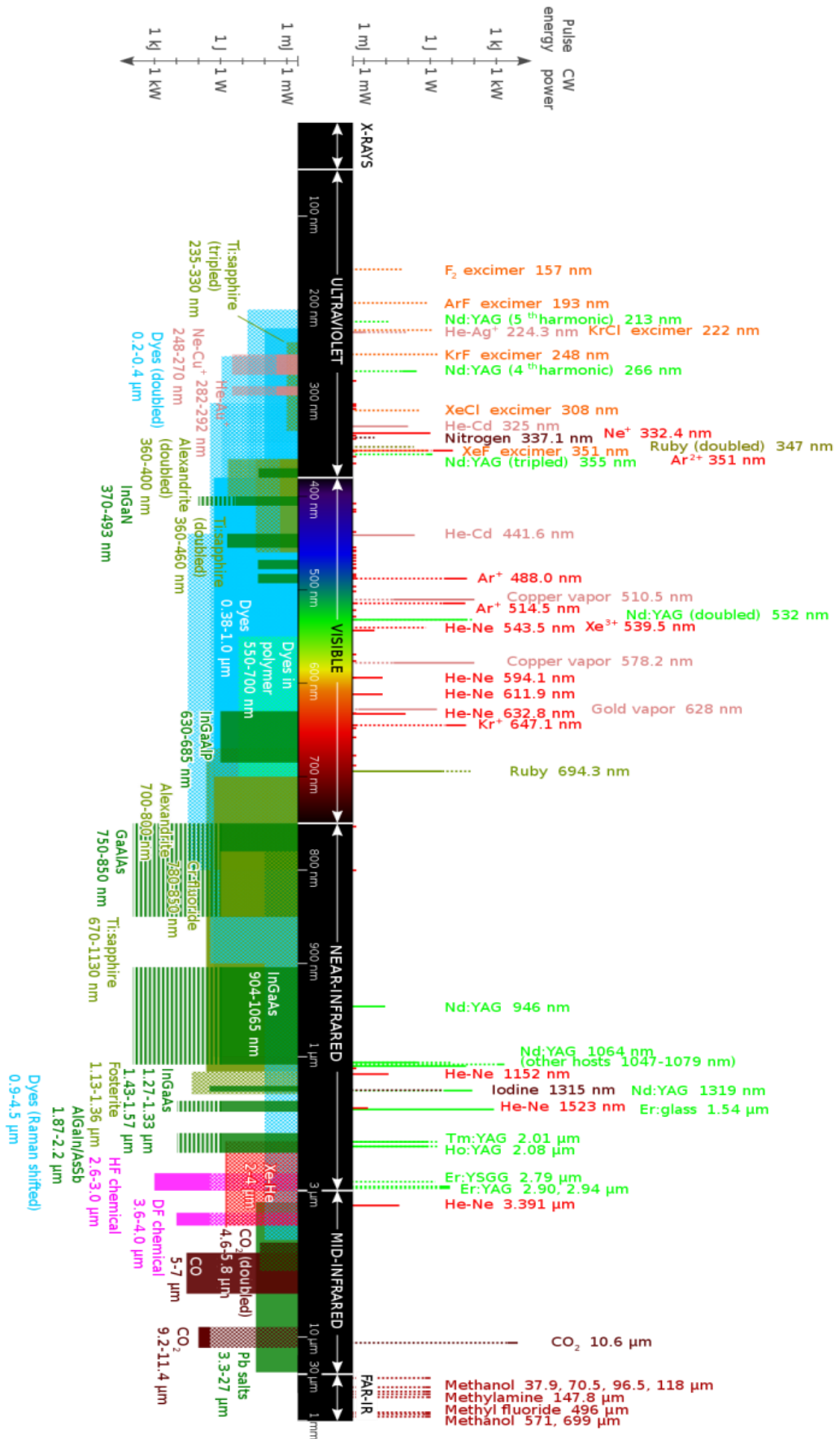
Ticari amaçla kullanılan lazerlerin dalga boyları 157 nm ile 699 μm arasında değişmektedir. Bu aralık, ultraviyole, görünür ve kızıl ötesi aralıklarında çalışan lazerleri kapsamaktadır. Lazerlerin dalga boyları ve enerjileri arasındaki ilişki şu eşitliklerle ifade edilir (Einstein, 1905).

$$E = h\nu, E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Bu eşitliklerde; E enerji olmak üzere, h Planck sabiti ve c ışık hızı iken, dalga boyu λ , frekans ise ν ile gösterilmiştir. Buradan kolaylıkla anlaşılacağı gibi frekansın artması ya da dalga boyunun azalması durumlarında enerji artacaktır ve bu durumun tam tersinde ise enerji azalacaktır. Şekil 2.2’de ticari amaçlı kullanılan lazerlerin dalga boylarına göre olan dağılımları gösterilmiştir (Wikipedia, 2012). Bu şekilde görüldüğü gibi yukarıdaki eşitlikte düşünülürse, 157 nm dalga boyu değerine sahip F_2 excimer lazeri en küçük dalga boyu değerine sahip olduğundan en yüksek enerjiye sahip iken, 571 - 699 μm dalga boyu aralığında çalışan metanol lazerleri en yüksek dalga boyuna dolayısıyla en düşük enerjiye sahiptirler.

Işınım kaynakları, uzun yıllardır pek çok bilim dalına hizmet etmekte olan ve gelişen teknoloji ile yenilenerek daha özel amaçlara hizmet edecek şekilde tasarlanabilecek duruma gelmiş; tarihsel gelişimleri incelendiğinde dayandıkları teknoloji, fiziksel yapıları ve sahip oldukları parametreler ile günümüzde dört nesle ayırabileceğimiz, ışınım üreten sistemlerdirler (Yavaş, 2001).

Bu sistemlerden elde edilen ışınımın genel özellikleri, belirli bir elektromanyetik spektrum aralığında ayarlanabilir olma, yüksek şiddet, kutuplanabilirlik, atmalı zaman yapısı, yüksek kararlılık ve eş fazlılık olarak sıralanabilir (Karşlı, vd., 2005). Aslında tüm bu özellikler, bilinen ilk ışınım kaynağı olan ve 1946’da General Electric tarafından üretilen sinkrotron ışınım kaynağının, 1947 yılında Frank Elder ve arkadaşları tarafından yapılan deneyler sonucunda “Radiation from Electrons in a Synchrotron” isimli makalede sıralanan özellikleridir (Elder vd., 1947).

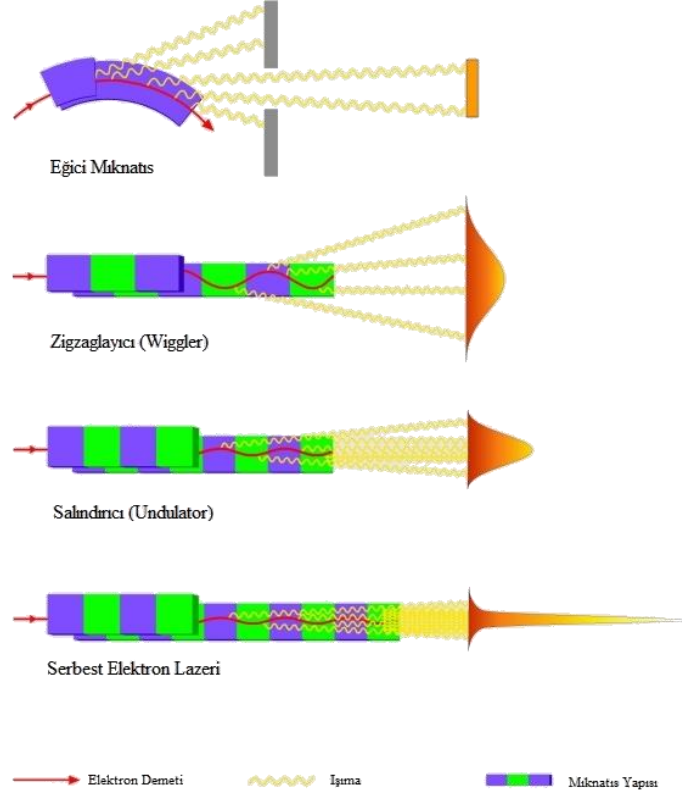


Şekil 2.2. Ticari amaçla kullanılan lazerlerin dalga boyları (Wikipedia, 2012)

Sinkrotron ışınımı (SI), yüklü parçacıkların (elektron ya da pozitron), rölativistik hızlarda eğrisel bir yörüngede hareket etmeleri sırasında, kinetik enerjilerinin bir kısmını ışınım olarak dışarı yaymaları sonucunda oluşur. Eğrisel hareketi sağlamak için manyetik alana ihtiyaç duyulur ve bu gereksinim depolama halkalarındaki eğici mıknatıslar tarafından sağlanır. Depolama halkaları, sürekli ya da atmalı yapıya sahip olabilen yüklü parçacıklardan oluşan demetlerin uzun periyotlar boyunca döndürebildiği bir dairesel hızlandırıcıdır ve aynı zamanda ışınım kaynaklarının en temelini oluşturdukları için sıfırıncı nesil olarak da adlandırılabilirler. Bu tip kaynaklarda ışınım şiddetli olmasına rağmen, ışınımın oluştuğu kaynak nokta her turda farklılık göstermekte ancak oluşan ışınımın spektral aralığı ve şiddeti kullanılan eğici mıknatısların özellikleriyle alakalı olarak aynı kalmamaktaydı. Zaman içerisinde yapılan çalışmalar neticesinde, ışınımın kaynak noktasının sabit hale getirilmesi sağlanarak; uzun ömürlü ve sabit karakterli demetlerin elde edilmesi ile birinci nesil SI kaynaklarının inşası mümkün olmuştur. Bu sistemlerde elde edilen ışınımın parlaklığı, eğici mıknatıslar ile elde edilen ışınımın parlaklığından 10^5 kat daha fazladır (Dattoli vd., 1993).

Birinci nesil SI kaynaklarında elde edilen geliştirilmeler sonucunda ilk tasarımlarda yer almayan ve “insertion devices” olarak adlandırılan salındırıcı (undulator) ve zigzaglayıcı (wiggler) mıknatısların halkaya eklenmesi sonucu ikinci nesil kaynaklar geliştirilmiştir. Bu kaynaklarda, mıknatıslar yardımı ile elektronlara sinusoidal ve zigzag hareketi yaptırılarak ışınım elde edilmiştir. Kullanılan mıknatısların periyot sayısı az fakat alan şiddeti büyük ise elde edilen ışınımın geniş spektrumlu olduğu gözlenmiştir. Aksi durumda yani periyot sayısı çok fakat alan şiddeti küçük olması durumunda ise oluşan ışınımın tek bir frekansta veya onun harmonikleri şeklinde olduğu görülmüştür. İlk durumdaki mıknatıs dizisi zigzaglayıcı olarak adlandırılırken ikinci durumdaki mıknatıs dizisi ise salındırıcı olarak adlandırılır ve salındırıcıdan elde edilen ışınımın parlaklığı, zigzaglayıcıdan elde edilen ışınımın parlaklığından daha fazladır (Wiedemann, 1993).

Şekil 2.3’de eğici, zigzaglayıcı ve salındırıcı mıknatıslar ile serbest elektron lazerinden elde edilen ışınımalar gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Eğici, zigzaglayıcı ve salındırıcı mıknatıslar ile SEL’den elde edilen ışınımalar (DESY, 2012)

İkinci nesil ışınım kaynakları, birinci nesil ışınım kaynaklarıyla kıyaslandığında parlaklığın 10^{16} mertebesinde ve yayınının ise birkaç yüz nm-rad boyutunda olduğu gözlemlenir (Dattoli vd., 1993).

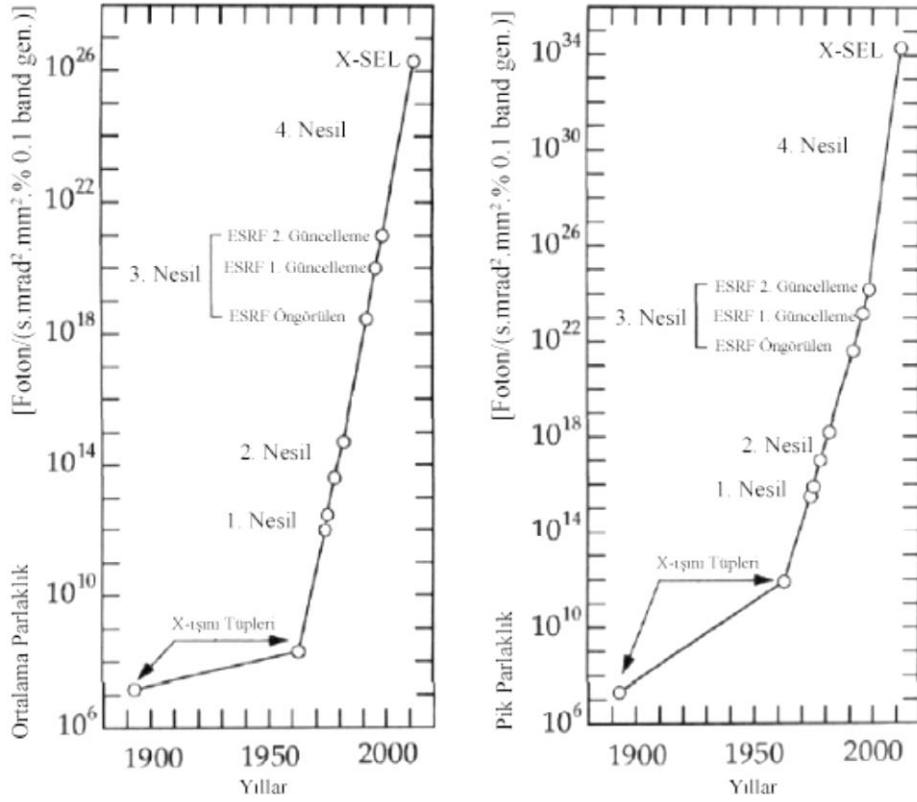
Elektron demet yayınındaki azalmanın; daha parlak ışınım ile sonuçlanması, 1980’lerin ortalarında yeni depolama halkalarının inşasına yönelmeye neden olmuş ve bu amaç doğrultusunda yani daha düşük yayınım değerlerine sahip elektron demetleri elde edebilmek amacıyla üçüncü nesil ışınım kaynakları geliştirilmiştir. Bu sistemlerde daha gelişmiş özelliklerde zigzaglayıcılar ve salındırıcılar kullanılarak 5 nm-rad ile 20 nm-rad yayınım değerleri aralığında ve 10^{20} mertebesinde parlaklığa sahip ışınım elde edilebilmiştir. Bu sistemlerde 5 nm-rad yayınım ve 60 nm’den daha uzun dalga boyu değerlerinde kırınım limitli ışınım oluşturulabilmiştir.

Burada adı geçen kırınım limiti, foton demetlerinin geometrik özelliklerindeki sınırlamayı oluşturur ve dalga boyu ile belirlenir. Foton demet yayınındaki bu limitli kırınım $\lambda/4\pi$ ile hesaplanır. Elektron demetleri tarafından üretilen ışınımında, elektron demet yayını $\sim \lambda/4\pi$ değerine kadar azalırken, foton demetinin parlaklığı artar (Dattoli vd., 1993).

Dördüncü nesil ışınım kaynaklarında ise hedef, üçüncü nesil ışınım kaynaklarında elde edilen başarılar sonucunda daha düşük elektron demet yayını, daha yüksek foton demet parlaklığı ve daha kısa dalga boyu değerlerine ulaşan kırınım limitlerine ulaşmak olmuştur. VUV ile sert X-ışını bölgeleri arasında elde edilen ışınım dördüncü nesil ışınım denilmesinin esas nedeni, bunların daha düşük yayınımlı olmaları ve dairesel ya da doğrusal hızlandırıcı (Linac) sürücülü kısa dalga boylu SEL'lerden elde edilen demetler olmalarıdır. 1990'lı yıllarda hayata geçirilen dördüncü nesil ışınım kaynaklarında, halka ya da doğrusal hızlandırıcılarda süper iletken kaviteler ile hızlandırılan çok düşük yayınımlı, yüksek pik akım değerli (pikosaniye mertebesinde paketçik uzunluğu, nC mertebesinde paketçik yükü) elektron demetleri kullanılmaktadır. Bu elektron demetlerinin; gelişmiş zigzaglayıcı veya salındırıcılardan geçmeleri sonucunda oluşturdukları; dalga boyları nm – Å metresinde; yüksek akı, parlaklık ve güç değerlerine sahip ışınımlar elde edilebilmektedir.

Bu ışınımlar SEL (Serbest Elektron Lazeri) olarak da adlandırılmaktadır (Dattoli vd., 1993). Şekil 2.4'de ortalama parlaklık ve pik parlaklığı değerlerinin yıllara göre değişimi gösterilmiştir (Gürtler, 1997).

Üçüncü nesil sinkrotron ışını ile SEL olarak da adlandırılan dördüncü nesil arasında dalga boyu, pik parlaklığı, ortalama parlaklık, güç ve benzeri karakteristik parametrelerde önemli farklılıklar bulunmaktadır. SEL'ler SI'lara göre pik değer olarak 10^{10} kat daha parlak ve 10^7 kat daha güçlü ışınım değerlerine sahiptirler (Dattoli vd., 1993).



Şekil 2.4. Işınım parlaklık değerlerinin yıllara göre evrimi (Gürtler, 1997)

SEL'ler, elektron demetini paketçik yapılarına bölerek optik alanda oldukça yüksek parlaklıkta, enine koherent ışınım üretirler. Bu olay salındırıcı mıknatısın oluşturduğu periyodik manyetik alan (optik alan) ile, elektron demetinin etkileşmesi sonucu gerçekleşir. Bir başka şekilde anlatılırsa, temel olarak SEL; elektronların rölativistik hızlarda serbest olarak hareket ederken, kutupları arasında sinusoidal bir manyetik alan bulunan salındırıcıdan geçerek, kinetik enerjilerinin bir kısmını elektromanyetik ışımaya yoluyla optik alana aktarması sonucu oluşan ayarlanabilir dalga boylu, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip monokromatik ve eş evreli bir lazer ışınımıdır (Marshall, 1985).

Serbest elektron lazerlerini geleneksel (klasik) lazerlerden ayıran en büyük fark, isminden de anlaşılacağı gibi elektronların geleneksel lazerlerde olduğu gibi bir atoma bağlı durumda olmayıp, vakum ortamında serbest olarak hareket edebilmeleridir. Işımanın dalga boyu, geleneksel lazerlerde, elektronlar atoma bağlı olduğundan iki enerji seviyesi arasındaki geçişlerle sınırlandırılmışken, serbest elektron lazerinde elektronlar serbest olarak hareket edebildiğinden ayarlanabilir

şekildedir. Bu dalga boyu, salındırıcı mıknatısların yerleştirilme sıklığı, oluşturdukları manyetik alan büyüklüğü ve kullanılan elektron demetinin enerjisi gibi dış parametrelere bağımlıdır. Bu özelliği sayesinde serbest elektron lazerleri, geleneksel lazer ışınımının aksine tek bir frekansta değil, geniş bir frekans aralığında üretilebilmektedir. Serbest elektron lazerlerindeki kazanç ise, ortamdaki elektromanyetik alanın ve elektronun yönüne bağlıdır (Marshall, 1985).

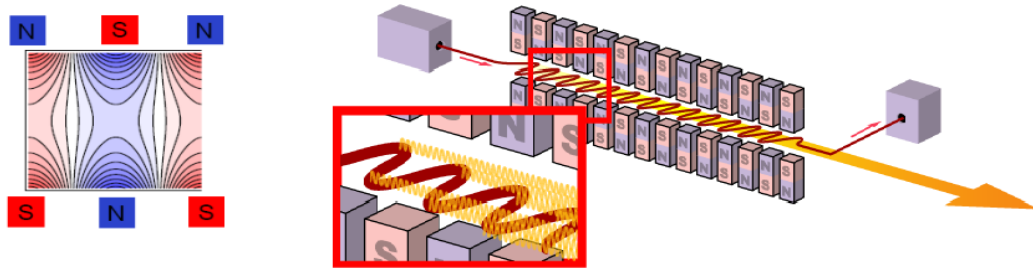
Pek çok alandaki araştırmacının ayarlanabilir, yüksek pik gücüne bağlı olan, yüksek tekrarlanabilirlik değerlerinde ve ortalama güç, yüksek mikro atma enerjisi, zaman esnekliği ve frekans modülasyonlu atmalara ihtiyaç duyması, serbest elektron lazerinin kullanımının geleneksel lazerlere oranla oldukça fazla olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle serbest elektron lazerleri laboratuvarları; malzeme bilimi, nanoteknoloji, foto-kimya, yarı iletken yapılar, lineer olmayan optik, atom ve molekül fiziği, yüzey ve ara yüzey fiziği, lazer optiği, biyoteknoloji gibi alanlara ve ürün geliştirmede öncü olan sanayi çevrelerine gelişmiş ve modern bir araştırma ortamı sunabilmektedir.

3. SERBEST ELEKTRON LAZERLERİ

Çalışmanın bu kısmında, Serbest Elektron Lazerleri (SEL) hakkında daha detaylı bilgiler verilerek çalışma prensipleri ve gerçekleşen fiziksel süreçler açıklanarak uygulama alanlarından bahsedilmiştir.

3.1. SEL Çalışma Prensibi

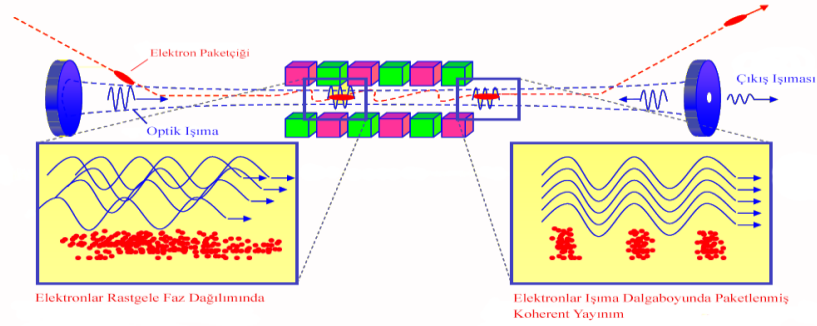
Serbest Elektron Lazerinin elde edilmesi için öncelikle elektronların; dairesel ya da doğrusal hızlandırıcılar kullanılarak elektronları yüksek hızlara ulaştırılır yani rölativistik elektron demetlerinin elde edilmesi sağlanır. Daha sonra bu elektron demetleri, sahip oldukları ardışık mıknatıs dizisi yapısı sayesinde kutupları arasında sinusoidal bir manyetik alan bulunan ve sahip oldukları alan şiddetine göre zigzaglayıcı veya salındırıcı olarak adlandırılan yapılara girerler. Salındırıcı içindeki elektron demeti x ekseninde sinusoidal hareket ederken bu mıknatısların sağladığı manyetik alan, y ekseninde dalga biçiminde olmasını sağlar. Yüksek hızlı rölativistik elektron demetlerinin bu çok kutuplu mıknatıs dizisinden geçmesi sonucu kinetik enerjisinin bir kısmını optik alana aktarmasıyla serbest elektron lazeri ışınması elde edilir (Marshall, 1985). Şekil 3.1’de bir salındırıcının yapısı detaylıca gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Salındırıcı yapısının detaylı gösterimi (Wikipedia, 2012)

Bir lazer ışınımı elde etmek için; kutup sıklığı ve toplam uzunluğu bilinen bir salındırıcı içinde; enerjisi, akımı ve yayınımı gibi özellikleri bilinen bir rölativistik elektron demeti geçirilerek elde edilen fotonların belirli bir doyuma ve güce ulaşması beklenir. Bunun ardından belirli bir noktada doyuma ulaşan fotonlar dışarı alınır ve SEL elde edilmiş olur (Luchini ve Motz, 1990).

Şekil 3.2’de gösterilen optik kavite şemasında, sol taraftan giriş yapan elektron demetleri, salındırıcıya doğru ilerlerken görülmektedir. Şeklin en solunda ve en sağında görülen ve rezonatör bölgesinin sınırlarını belirleyen aynalardan biri (şekilde soldaki) tam yansıtma özelliği sağlayacak şekilde kaplanmışken diğeri (şekilde sağdaki) ortasında zayıflatılmış bir bölge veya delik olacak şekilde kaplanmıştır. Bu sayede, ışınım doyuma ulaştığında dışarı alınabilecektir. Salındırıcı mıknatısların olduğu bölgede, aynalar sayesinde enerjilerine paralel olarak git-gel hareketi yaparak, başlangıçta uyumsuz olan ışınlar yaymaya başlayan elektron demetleri, bu ışınlar doyuma ulaştıkça kadar aynı özelliklere sahip hale gelirler. Aynı esnada elektronlar da daha belirgin paketçikler haline gelirler (mikro paketleme) (Luchini ve Motz, 1990).

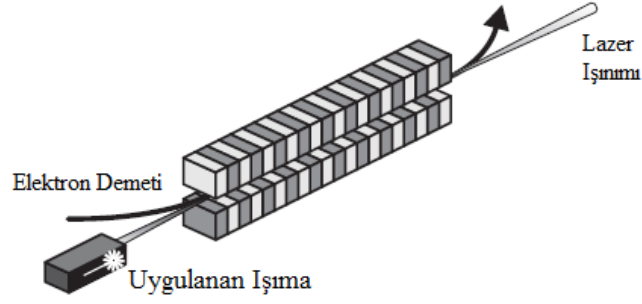


Şekil 3.2. Elektron paketçikleri ile elektromanyetik alan arasındaki etkileşim (Dattoli vd., 2010)

3.2. SEL Tipleri

Serbest elektron lazerleri, elektron demetlerinin doğrusal ya da dairesel hızlandırıcılarda hızlandırıldıktan sonra lazer ışınının oluşturulacağı ve dışarıya alınacağı düzeneklere göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar Yükselteç SEL’ler, Osilatör SEL’ler ve SASE yani Self-Amplified Stimulated Emission (Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım) SEL’lerdir (Braun, 1990).

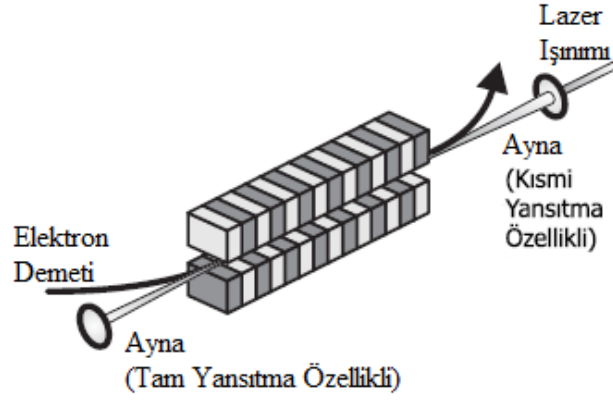
Yükselteç SEL’ler var olan en basit SEL tipidir. Bu cihazlarda, salındırıcı içinde hareket eden elektron demetlerine dışarıdan bir ışınım (lazer) uygulanır. Bu ışınım alanı elektron demetleri ile etkileşime girerek daha güçlü bir hale gelmelerini sağlar. Sonrasında salındırıcı mıknatıslardan geçen elektron demetleri dışarı alınır. Şekil 3.3’de bir yükselteç SEL’e ait şematik gösterim bulunmaktadır (Khan, 2008).



Şekil 3.3. Yükselteç SEL (Khan, 2008)

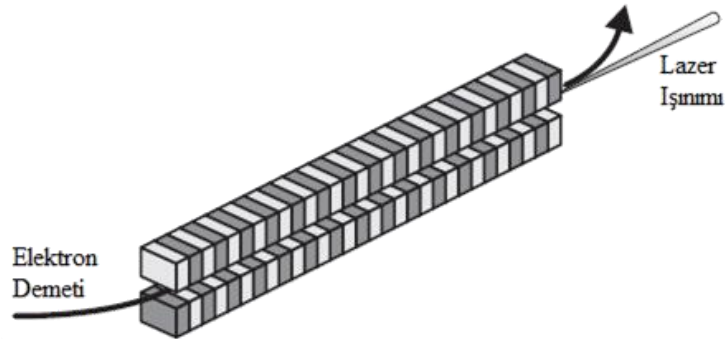
İkinci tip olan Osilatör SEL'in temel bileşenleri elektron demeti, salındırıcı ve ayna sistemidir. Doğrusal ya da dairesel elektron hızlandırıcıları tarafından hızlandırılarak rölativistik hızlara ulaştırılan elektron demeti, salındırıcı bölgesinden geçerken bir koni biçiminde ve salındırıcı eksenini boyunca olacak şekilde ani ışınmalar yaparlar.

Osilatör SEL'lerde, yükselteç SEL'lerde olduğu gibi etkileşim sonucu oluşan lazer ışınımı direk olarak dışarı alınmaz. Bunun yerine, oluşan ışınım, salındırıcının başında ve sonunda konumlandırılan iki ayna arasında yansıtılır. Bu süreçte elektron paketçikleri ile elektromanyetik alan arasındaki etkileşim, ışınımın dalga boyunun eş fazlı yapıda oluşmasını sağlar. Bu durum neticesinde elde edilecek lazer ışınımı da eş fazlı yapıya sahip olacaktır. Salındırıcının iki ucuna yerleştirilen aynaların kapsadığı ve içerisinde salındırıcıyı da bulunduran bu bölgeye rezonatör ismi verilir. Bu aynalardan birisi tam yansıtma özelliği sağlayacak şekilde tasarlanmışken, ışınımın belirli karakteristik özelliklere ulaşması sonucu dışarıya alınacağı diğer uçtaki aynanın ise ortasında zayıflatılmış bir bölge veya delik olacak şekilde tasarlanmıştır (Luchini ve Motz, 1990). Şekil 3.4 Osilatör SEL'e ait şematik gösterimdir.



Şekil 3.4. Osilatör SEL (Khan, 2008)

Bir diğer SEL tipi olan ve “Self-Amplified Stimulated Emission” kelimelerinin baş harflerinden oluşan SASE yani Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım SEL, elektron demetinin optik kavitesiz fakat oldukça uzun bir salındırıcı mıknatıstan geçmesi prensibine dayanır. Elektron demetinin salındırıcı içerisinde bir kez geçirilirken, gürültüden başlayan ışınımın genlik olarak doyuma ulaşacak kadar uzun bir salındırıcıdan geçmesi ile ışınım elde edilir. SASE SEL’lerde kullanılacak salındırıcının uzunluklarının artırılması neticesinde, osilatör ve yükselteç SEL’lerde teknolojik yetersizlikler – yükselteç SEL’in yeterli olmaması ve osilatör SEL’de karşılaşılan ayna kusurları – ve limitler nedeniyle inilemeyen 180 nm dalga boyu değerinin altında, VUV ve yumuşak X-ışını bölgelerinde serbest elektron lazeri üretilebilmektedir. Ayrıca SASE SEL’ler, osilatör ve yükselteç SEL’lerle kıyaslandığında, oluşan ışınımın daha koherent yani daha fazla eş fazlı olduğu ve daha monokromatik yani tek renkliliğinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir (Ciocci vd., 2000). Şekil 3.5’de bir SASE SEL’in şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.5. SASE SEL (Khan, 2008)

3.3. SEL Fiziği

Klasik lazerlerin çalışma prensibi, daha öncede anlatıldığı gibi optik kavite içerisinde bulunan kazanç ortamı ile ilişkilidir. Bu kazanç ortamı; katı, sıvı ya da gaz olabilir. Yükseltilecek elektromanyetik dalga, bu katı, sıvı ya da gaz enerji rezervuarı boyunca hareket ederek uyarılmış ışınımın neden olmakta ve bu ışınım optik kavite sistemi ile istenilen karakteristik özelliklere sahip olduğunda ve doyuma ulaştığında dışarı alınmaktadır. Dalga, kazanç ortamını yani enerji rezervuarını terk ettiğinde aynı frekansa sahip fakat daha şiddetli halde olacaktır (Marshall, 1985).

Klasik lazerlerde, başlangıçta yükseltmek üzere ortama sağlanacak dalga optik pompalama veya kimyasal süreçlerle sağlanırken, Serbest Elektron Lazerlerinde bu ortam yüksek enerjili elektron demetleri olmaktadır. Bu nedenle enerji değişimi, klasik lazerlerde olduğu gibi, bağ elektronlarının atomik enerji seviyeleri arasındaki geçişleri vasıtasıyla değil; manyetik alan içeren bir bölgede serbest halde dolaşabilen elektron demetlerinin, bu alanla elektromanyetik etkileşimleri ile sağlanmaktadır. Atomik enerji düzeylerine bağlılığı olmadığı için SEL'ler geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilmektedirler (Dattoli vd., 1993).

Bu kısımda SEL Fiziği hakkında bilgi verilirken, sistemin genel yapısı göz önüne alınarak alt sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu nedenle öncelikle işlemlerin ilki olarak elektron tabancasında üretilen ve paketlenen elektron demetlerinin hızlandırıcı içerisindeki radyasyon güçleri, ardından hızlandırıcıdan çıktıktan sonra salındırıcıya giren bu elektron demetlerinin salındırıcı içindeki hareket denklemleri incelenmiştir. Son olarak ise, salındırıcı bölgesindeki elektron demeti ile buradaki elektromanyetik dalganın etkileşimleri hesaplanmış ve aralarındaki ilişki gösterilmiştir.

3.3.1. Hızlandırıcı içerisindeki elektron demetinin ışımaya gücü, ışımaya kazanç ve kayıpları

Klasik elektromanyetikten bilindiği gibi ivmeli hareket eden elektronlar, elektromanyetik ışımaya yaparlar ve yaptıkları bu ışımaya gücü Larmor formülü olarak bilinen Denk. (3.1) ile hesaplanabilir (Dattoli vd., 1993):

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} (\dot{u}^*)^2 \quad (3.1)$$

Burada; kullanılan terimlerden ϵ_0 vakumun dielektrik geçirgenlik katsayısı, c ışık hızı ve \dot{u}^* ise elektronun laboratuvar referans sistemindeki ivmesidir. Bu denkleme göre, herhangi bir sistemde gözlemlenen güç P , hareket edilen sistem üzerindeki gözlemci tarafından hesaplanan güç olan P^* ile aynı değere sahip olacaktır. Bu gerçeklik, laboratuvar sisteminde gözlemlenmiş olan radyasyon gücünü hesaplamak için kolaylık sağlamaktadır. Bu nedenle \dot{u}^* ivmesi, laboratuvar sisteminde ölçülmüş olan değerler ile ifade edilebilir. Lorentz dönüşümleri uygulanarak hesaplanan \dot{u}^* ivmesinin x, y ve z eksenlerindeki bileşenleri Denk. (3.2)'de gösterildiği gibidir (Lannen, 1997) .

$$\dot{u}_x^* = \gamma^3 \dot{v}_x \quad \dot{u}_y^* = \gamma^3 \dot{v}_y \quad \dot{u}_z^* = \gamma^3 \dot{v}_z \quad (3.2)$$

Bu eşitliklerde γ rölativistik hız faktörüdür ve $1/\sqrt{1 - \beta^2}$ şeklinde ifade edilirken β ise v_0/c 'dir. Bu durumda e parçacık yükünün, N tane e_0 giriş yükünden oluştuğunu düşünürsek, Denk. (3.2) şu biçimde tekrar yazılabilir (Dattoli vd., 1993).

$$P = \frac{Ne_0^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \dot{v}_\gamma^2 \quad (3.3)$$

Işımada oluşabilecek kayıplar, parçacık hızlandırıcılar için ulaşılabilecek maksimum kullanılabilir enerjiyi limitlerler. Doğrusal hızlandırıcılarda hareket tek boyutlu olduğu için Denk. (3.4) yazılabilir (Dattoli vd., 1993).

$$\frac{dp}{dt} = m_0 \gamma^3 \dot{v} \quad (3.4)$$

Dolayısıyla Larmor formülü Denk. (3.5)'de gösterildiği şekilde ifade edilebilir (Dattoli vd., 1993).

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3} \left(\frac{dp}{dt} \right)^2 \quad (3.5)$$

Momentumdaki değişim, x doğrultusunda hareket ettiği varsayılan parçacığın üzerine etkiyen kuvvete, dolayısıyla parçacığın birim mesafedeki enerji değişimine eşit olduğundan Denk. (3.6)'daki ifade yazılabilir (Dattoli vd., 1993).

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3} \left(\frac{dE}{dx} \right)^2 \quad (3.6)$$

Doğrusal hızlandırıcılarda, oluşan ışıma parçacığın üzerine etkiyen dış kuvvet ile orantılı olup, parçacığın sahip olduğu gerçek enerji ve momentumdan bağımsızdır. Bu eőitlikler düşünöldüğünde, elektron gibi hafif parçacıkların proton gibi daha ağır parçacıklardan çok daha fazla ışıma oluőturacakları görölebilir. Oluşan bu ışımının harici kaynak tarafından sağlanan güce oranı ise Denk. (3.7)'deki gibi ifade edilir (Dattoli vd., 1993).

$$\frac{P}{dE/dt} = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m_0^2 c^3} \frac{1}{v} \frac{dE}{dx} \cong \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 m_0 c^2} \frac{1}{m_0 c^2} \frac{dE}{dx} \quad (3.7)$$

Burada, rölativistik parçacıklar için $v \cong c$ olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak tüm bu eőitliklerden çıkarılabilecek olan ise, $e^2/(6\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 1.28 \times 10^{-15}$ metre ve enerji kazancının $m_e c^2 = 0.511$ MeV olduğu mertebede, doğrusal hızlandırıcılarında kaybın ihmal edilebilecek kadar küçük olduğudur. Burada kazanç 3×10^{14} MeV/metre'dir. Tipik enerji kazancı 10 MeV/metre'den daha düşüktür.

Sinkrotron ve betatron gibi dairesel hızlandırıcılarda ise durum oldukça farklıdır. Bu tip makinalarda momentum p, parçacığın dönmesinden dolayı doğrultu olarak çabukça değişmekte fakat her devirde enerji değişimi azalmaktadır. Ayrıca, hızlanmanın doğrultusu her zaman hareket doğrultusuna dik olmaktadır. Bu durumda Denk. (3.8)'deki eşitlik yazılabilir (Dattoli vd., 1993):

$$P = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \dot{v}^2 = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{\gamma^4 v^4}{\rho^2} \quad (3.8)$$

Burada ρ parçacığın izlediği yörünge yarıçapıdır. Ayrıca, dairesel hareket için standart olan sonuçlardan $\dot{v} = v^2/\rho$ kullanılmıştır. Sonuç olarak, tur başına oluşan ışınım enerjisindeki kayıp Denk. (3.9)'daki şekilde hesaplanır (Dattoli vd., 1993).

$$\delta E = \frac{2\pi\rho}{v} P = \frac{e^2}{3\epsilon_0 c^3} \frac{\gamma^4 v^3}{\rho} \quad (3.9)$$

Yüksek rölativistik durumlarda ise bu ifade Denk. (3.10)'a dönüşür.

$$\delta E \text{ (MeV)} = 8.85 \times 10^{-2} \frac{[E \text{ (GeV)}]^4}{\rho \text{ (metre)}} \quad (3.10)$$

3.3.2. Salındırıcı içerisindeki elektron demetinin hareket denklemi

Rölativistik hızlarda hareket eden elektronlar, salındırıcı mıknatısların dizilimlerine göre düzlemsel ya da sarmal olarak isimlendirilen salındırıcı bölgelerine girdiklerinde; manyetik alan bileşenlerinden etkilenirler ve yatay, dikey ya da dairesel hareketler şeklinde salınımlar yapmaya başlarlar (Wille, 1996).

Salındırıcılar, farklı dizilimlere sahip olabilseler de temel amaçları, periyodik olarak dizilmiş olan mıknatıslar ile sinkrotron ışınımının yoğun ve daha çok koni özelliğinde oluşmasını sağlamaktır (Dattoli vd., 1993).

Sarmal salındırıcı mıknatısları ele alarak elektronların bu hareketlerini inceleyelim. Eğer bir sarmal salındırıcı λ_u periyodik uzunluğuna ve dolayısıyla k_u manyetik dalga sayısına sahip ise salındırıcının manyetik alan bileşenleri ve k_u Denk. (3.11)'de gösterildiği gibi şu şekilde yazılabilir (Wille, 1996).

$$\vec{B} = B \begin{bmatrix} -\sin(k_u z) \\ \cos(k_u z) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u} \quad (3.11)$$

Lorentz kuvvetinden faydalanarak elektronların bu manyetik alan bileşenlerine sahip salındırıcı içerisinde geçerken izleyecekleri yörüngeleri hesaplamak için Denk. (3.12)'deki eşitlik elde edilir (Wille, 1996).

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m\gamma\dot{\vec{v}} = m\gamma \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = e \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \times \vec{B} = eB \begin{bmatrix} -\dot{z} \cos(k_u z) \\ -\dot{z} \sin(k_u z) \\ \dot{x} \cos(k_u z) + \dot{y} \sin(k_u z) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'nin çözümünde, helazonik hareket için, elektronun z eksenini boyunca hızı $v_z = \text{sabit}$, $z = v_z t = \beta_z c t$ olarak alınır. Burada β_z , elektronun z eksenindeki hız faktörüdür. Elektron hareketinin x ve y eksenlerindeki hız bileşenleri ise Denk. (3.13)'de gösterildiği gibi yazılabilir (Wille, 1996).

$$\vec{v} = \frac{qB}{m\gamma} \begin{bmatrix} -\dot{z} \cos(k_u z) \\ -\dot{z} \sin(k_u z) \\ \dot{x} \cos(k_u z) + \dot{y} \sin(k_u z) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

İlk iki terim birlikte düşünüldüğünde, $K = \frac{eB}{mck_u}$ salındırıcı parametresi olmak üzere Denk. (3.14) elde edilir (Wille, 1996).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = c \frac{K}{\gamma} \begin{bmatrix} -\sin(k_u z) \\ \cos(k_u z) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Eğer K, salındırıcı parametresini pratik birimler cinsinden yazılmak istenirse, manyetik alan değeri olarak B_u alındığında Denk. (3.15) elde edilir (Wille, 1996).

$$K = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi m_e c} = 0.9337 B_u [\text{T}] \lambda_u [\text{cm}] \quad (3.15)$$

Denklem (3.15)'den ;

$$\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t) = \frac{c^2 K^2}{\gamma^2} \quad (3.16)$$

olacağından ve z eksenindeki hız bileşeni $\beta_z = v_z/c$ olarak alınır;

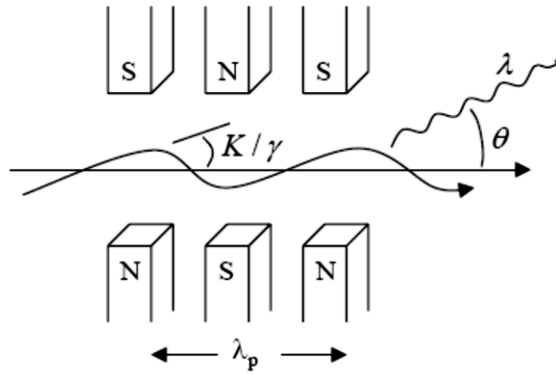
$$\beta_z = \frac{v_z}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{\dot{z}^2 - (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)} \quad (3.17)$$

olarak yazılabileceğinden, yaklaşık olarak Denk. (3.18) elde edilir (Wille, 1996).

$$\beta_z = \frac{1}{c} \sqrt{v^2 - \dot{x}^2 - \dot{y}^2} = \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{K}{\gamma}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2} - \left(\frac{K}{\gamma}\right)^2} \quad (3.18)$$

$$\beta_z \approx 1 - \frac{1}{2\gamma^2} (1 + K^2)$$

Salındırıcı içerisinde yatayda hareket etmek isteyen elektron, salındırıcı boyunca manyetik alan ile karşılaştığında ise boyuna hız bileşeninde periyodik değişime uğrar. Bu değişim halinde elektronun eksen üzerindeki dik hız bileşeni v_{\perp} ; $\frac{v_{\perp}}{c} = \frac{K}{\gamma} \approx \frac{1}{\gamma}$ olarak gözlemlenir (Wille, 1996). Bu durum eksen boyunca hız bileşeni ile birleştiğinde yatay eksen yönünde eğilmelere neden olur. Parçacığı ideal yörüngesine götürecektir olan maksimum açı θ , Şekil 3.6'da gösterilmektedir (Wille, 1996).



Şekil 3.6. Sapma açısı θ 'nın gösterimi (Gezgin, 2009)

İdeal yörüngesinde seyahat eden parçacığın ulaşabileceği maksimum sapma açısı olan θ ise Denk. (3.19)'da gösterildiği şekilde hesaplanır (Wille, 1996).

$$\theta = \dot{x}_{\max} = \frac{K}{\gamma} \quad (3.19)$$

Salındırıcı ya da zigzaglayıcı içerisinde; K parametresinin $K=1$ olduğu durumlarda $\theta = 1/\gamma$ şeklinde olacaktır. θ ; aynı zamanda sinkrotron ışınımının doğal yayılma açısı olarak da tanımlanabilmektedir. Salındırıcıda K parametresine bağlı olarak mıknatısların eğiciliği çok zayıftır ve dolayısıyla θ , çok küçük olacak yani yayılma açısı oldukça düşük olacaktır ki bu istenen bir durumdur.

Oysaki zigzaglayıcılarda eğicilik daha kuvvetli olduğundan K parametresi artacak, dolayısıyla θ büyüyecektir. Bu durumda, zigzaglayıcılarda eğicilik daha kuvvetli olduğundan geniş bir spektrumda ışımaya oluşacaktır (Dattoli vd., 1993).

3.3.3. Elektron demeti ile salındırıcı arasında etkileşim

Elektron demeti ile lazer alanı arasında bir enerji değişiminin olması, hareket halindeki elektron demetinde bulunan elektronun sahip olduğu enine hız bileşeni ile ilgilidir (Dattoli vd., 1993). Bu durumu anlayabilmek ve daha detaylı tartışabilmek için sarmal bir salındırıcıyı ele alalım. Bu salındırıcıdaki elektrik alanı \vec{E} ve manyetik alan \vec{B} olarak Denk. (3.20) ve Denk (3.21)'de verildiği şekilde ifade edilebilir (Wille, 1996).

$$\vec{E} = E_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ \sin(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\vec{E}_L = E_0 \begin{bmatrix} \cos(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ \sin(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad \vec{B}_L = \frac{1}{c\omega_L} \dot{\vec{E}}_L \quad (3.21)$$

Burada, z eksenini üzerindeki elektron demetlerine paralel olarak dışarıdan uygulanan elektromanyetik dalganın hareketi incelenirse, dalga üzerinde elektrik alan vektörünün z bileşenine sahip olmadığı görülür. Yani $E_{L,z} = 0$ 'dır.

Lazerin elektrik alanının x bileşeni, Denk. (3.22)'de verilen bir düzlem dalga şeklinde ele alınabilir (Wille, 1996).

$$E_{L,x} = E_{L,0} \cos(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \quad (3.22)$$

Burada; ω_L lazer alanının frekansını, k_L lazer alanının dalga sayısını ifade eder ve $k_L = 2\pi/\lambda_L$ 'dir. φ_0 ile ifaden edilen değer ise başlangıç fazıdır (Wille, 1996).

Lazerin elektrik alanı ve elektron arasındaki enerji alış-verişi sonucunda, oluşan serbest elektron lazerinin enerjisi ve dolayısıyla dalga boyu hesaplanabilir. Bu etkileşimler, lazerin $E_{L,x}$ elektrik alanı ile elektronun yatay hız bileşeni arasında gerçekleşir. Salındırıcı mıknatısın periyodu ve lazer alanı arasındaki faz, ancak belirli şartlar sağlanırsa pozitif enerji kazancına dönüşür.

Belirli bir zamanda ve belirli bir noktada bulunan elektronun enine hız bileşeninin v_x olduğunu varsayalım. Tam bu anda ve konumda v_x enine hız bileşenine sahip elektron, lazerin elektrik alanının maksimumu ile karşılaşır ve bu alan v_x ile aynı yönde olursa; bu durumda negatif yüklü elektron bu alan tarafından yavaşlatılır ve aradaki enerji farkı lazer alanına transfer edilmiş olur. Bu durum ilk yarı periyotta gerçekleşen olaydır. İkinci yarı periyotta artık elektron $-v_x$ enine hız bileşenine sahip olacaktır. Bir parçacık olarak elektron, dalga formunda olan lazerin elektromanyetik alanından her zaman daha yavaş hareket edeceğinden ve aynı zamanda elektronun ileri yönde hareketini sağlayan salındırıcıdaki eğicilik sebebiyle, lazer alanı elektronun önünde hareket edecektir. Eğer sistemdeki faz kayması $\Delta\phi = \pi$ olacak şekilde ayarlanırsa, elektron üzerine etkiyen elektrik alanı $-E_L$ olacak ve bu durumda elektron yine enerji kaybederek aradaki enerji farkı lazer alanına aktarılacaktır. Bu işlem elektron salındırıcı sonuna ulaşınca kadar devam eder ve buradaki sonuç lazer alanının enerji kazancını gösterir (Wille, 1996).

Salındırıcı içerisinde sinusoidal salınım hareketi yapan elektronun enerjisindeki değişim, yani lazer alanına aktarılan veya bu alandan alınan enerji, E ile ifade edilirse, bu değer Denk. (3.23)'deki şekilde hesaplanacaktır (Wille, 1996).

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= mc^2 \frac{d\gamma}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{F} = e \cdot \vec{v} \cdot \vec{E}_L = e(\dot{x}E_{L,x} + \dot{y}E_{L,y}) \\ &= -ec \frac{KE_0}{\gamma} \sin\{(k_u + k_L)z - \omega_L t + \phi_0\} \\ &= -ec \frac{KE_0}{\gamma} \sin \psi \end{aligned} \quad (3.23)$$

Bu denklemde salındırıcı içerisindeki elektronun enine hız bileşeni ile elektromanyetik dalga arasındaki faz açısı yani penderomotive fazı ψ ile gösterilmiştir ve bu değer Denk. (3.24)'deki şekilde tanımlanabilir (Wille, 1996).

$$\psi = (k_u + k_L)z - \omega_L t + \varphi_0 \quad (3.24)$$

Bu denklemde $z = v_z t = \beta_z c t$ olarak alınırsa penderomotive fazı, ψ , Denk. (3.25)'de gösterildiği gibi elde edilir (Wille, 1996).

$$\psi = (k_u + k_L)z - \frac{\omega_L z}{\beta_z c} + \varphi_0 \quad (3.25)$$

Penderomotive faz açısı ψ , sabit kaldığı sürece lazer alanı ile elektron arasındaki enerji transferi devam eder. Böylece sabit faz açısı ψ ile rezonans koşulu oluşur ve lazer alanına göre faz kayması olmayan durum Denk. (3.26)'daki gibi ifade edilir (Wille, 1996).

$$\frac{d\psi}{dz} = (k_u + k_L) - \frac{\omega_L}{\beta_z c} = 0 \quad (3.26)$$

Bu eşitlikte; $\omega_L = c k_L$ olarak kabul edilirse, ifade Denk. (3.27)'de gösterildiği şekilde olur (Wille, 1996).

$$k_u + k_L - \frac{k_L}{\beta_z} = 0 \quad (3.27)$$

$\lambda_L = 2\pi/k_L$ olduğu için çözümde rezonans koşulu sağlanır ve lazerin dalga boyu Denk. (3.28)'deki gibi ifade edilir (Wille, 1996).

$$\lambda_L = \lambda_u \frac{1 - \beta_z}{\beta_z} \approx \lambda_u (1 - \beta_z) \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2) \quad (3.28)$$

Elektromanyetik dalgaya, elektron demetinden gerçekleşen enerji aktarımının sürekli olabilmesi için aynı zamanda rezonans koşulunun da sağlanması gerekmektedir. Bu

koşula göre; belirli bir enerji ile salındırıcıya giren tüm elektronlar enerji aktarımından dolayı hızla rezonans enerjisi kadar bir enerjiyi dalgaya aktarırlar. Bu durum sonucunda, rezonansı önemsenmeyecek kadar az olan enerjiler ile elektronlar için, ψ faz açısı kayacaktır (Wille, 1996).

Rezonans enerjisi, lazer alanında faz kayması olmayan, yani, $\frac{d\psi}{dz} = 0$ koşulunun sağlandığı enerji olarak açıklanır. Bu enerji koşulu aynı zamanda Denk. (3.29)'da gösterildiği gibi şu şekilde ifade edilir (Dattoli, 1993).

$$\gamma_r^2 = \frac{k_L}{2k_u} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (3.29)$$

Serbest elektron lazeri, rezonans enerjilerine çok yakın değerlerde bulunan elektron enerjilerinden oluşur. SEL elde etmek için avantaj sağlayacak bir durum ise, toplam enerji transferini, rezonans enerji ile ilişkilendirmek ve rezonans enerjisinden olan sapmayı bir değişken olarak kullanmaktır. Burada $\Delta\gamma$ elektronun enerji değişimi olmak üzere Denk. (3.30) ile ifade elde edilir (Dattoli, 1993).

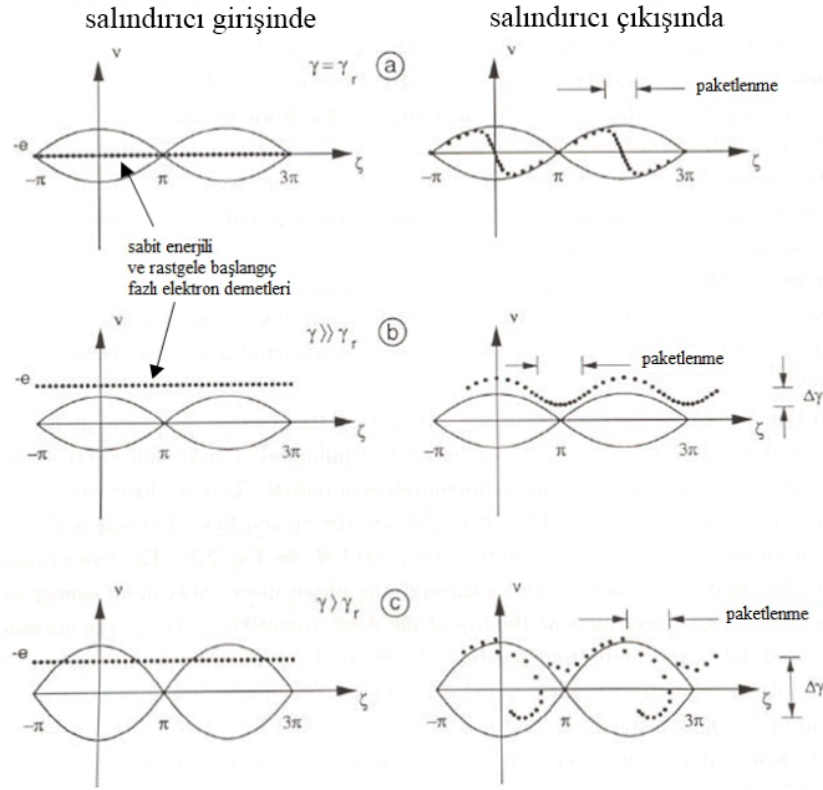
$$\gamma = \gamma_{res} + \Delta\gamma \quad , \quad \Delta\gamma \ll \gamma_s \quad (3.30)$$

Bu denkleme göre, elektronların sahip oldukları toplam enerji (γ), rezonans enerjisinden (γ_r) küçük olduğu durumlarda ($\gamma \ll \gamma_r$) elektronlar enerji kazanırlarken, tam tesi durumda yani ($\gamma_r \ll \gamma$) koşulunda elektronlar enerji kaybederler. Elektronların enerji kazandıkları durumda, yani $\Delta\gamma$ negatif olduğunda lazer alanından enerji alınıyorken, elektronların enerji kaybettikleri durumda yani $\Delta\gamma$ pozitif olduğu durumda lazer alanına elektronlardan sağlanan enerji aktarılmaktadır. Kısacası elektronun kaybettiği (ya da kazandığı) enerji, radyasyon alanının enerji kazanmasına (ya da kaybetmesine) sebep olacaktır. Elektronların salındırıcıdaki her geçişinde radyasyon alanında enerji kazancı (veya kaybı); elektronların faz uzayında hangi konumda başladıklarına bağlıdır (Dattoli, 1993).

$\Delta\gamma$ 'nın sıfır olduğu yani ($\gamma_r = \gamma$) durumunda ise, lazer alanı ile elektron demetleri arasında kayıp ve kazanç eşit olduğundan enerji geçişi olmamaktadır. Eğer ışığın

optik kavite içerisindeki olası kayıplarını göz önüne alırsak, elektromanyetik dalga enerjisindeki kaybın kazanca eşit olduğu duruma kararlı durum denir (Dattoli, 1993).

Şekil 3.7’de bu üç duruma göre salındırıcı girişinde ve çıkışında elektron demetleri ile lazer alanlarının etkileşimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Salındırıcı giriş ve çıkışında elektron-lazer etkileşimlerinin sonuçları (Özkorucuklu, 2011)

Şekil 3.7’de “a” ile gösterilen bölge rezonans bölgesidir. Burada enerji aktarımı söz konusu değildir fakat elektron demetinde paketlenme gerçekleşmiştir. “b” ile gösterilen bölge ise rezonanstan uzak bölgedir. Bu kısımda elektronlar dalgaya yakalanmadığı için bir miktar paketleme gerçekleşmekte ve bir miktar enerji transferi olmaktadır. “c” ile gösterilen bölge ise rezonansa yakın bölgedir. Burada birçok elektron dalga tarafından yakalanır ve güçlü bir paketlenme gerçekleşir. Ayrıca büyük bir enerji transferi de söz konusudur (Özkorucuklu, 2011).

Denklem (3.30)’daki koşullar Denk. (3.29)’dan yararlanılarak Denk. (3.26)’ya dâhil edilirse sonuç olarak Denk. (3.31) ile gösterilen ifade elde edilir (Wille, 1996).

$$\frac{d\Psi}{dz} = (k_u + k_L) - \frac{\omega_L}{c\left(1 - \frac{1+K^2}{2(\gamma_{res} + \Delta\gamma)^2}\right)} \approx (k_u + k_L) - \frac{\omega_L}{\beta_z(\gamma_{res})c} + \frac{\omega_L(1+K^2)}{c\gamma_{res}^3}\Delta\gamma \quad (3.31)$$

$$\frac{d\Psi}{dz} = \frac{\omega_L(1+K^2)}{c\gamma_{res}^3}\Delta\gamma = k_u \frac{2}{\gamma_{res}}\Delta\gamma$$

Burada ψ faz açısının z ye bağlı ikinci dereceden türevini almak istersek, Denk. (3.32) elde edilecektir (Wille, 1996).

$$\frac{d\Psi}{dz} = k_u \frac{2}{\gamma_{res}}\Delta\gamma \Rightarrow \frac{d^2\Psi}{dz^2} = k_u \frac{2}{\gamma_{res}} \frac{d\gamma}{dz} \quad (3.32)$$

Daha önceden elde ettiğimiz Denk. (3.32)'deki formu kullanırsak Denk. (3.33)'ü ve bunun sayesinde de Denk. (3.34)'de gösterilen frekans denklemini elde ederiz (Wille, 1996).

$$\frac{d^2\Psi}{dz^2} = -\frac{2e}{m_0c^2} \frac{E_0 K k_u}{\gamma_{res}^2 \beta_z} \sin \Psi = -\Omega^2 \sin \Psi \quad (3.33)$$

$$\Omega^2 = \frac{2e}{m_0c^2} \frac{E_0 K k_u}{\gamma_{res}^2 \beta_z} \quad (3.34)$$

Bu eşitlik; $\psi''(s) + \Omega_L^2 \sin \psi(s) = 0$ şeklinde gösterilebilen $\Delta\gamma - \psi$ faz uzayındaki sarkaç denklemdir. Burada Ω frekansı; bir eksen boyunca salınım uzunluğu $L = \frac{2\pi}{\Omega}$ ve $f_L = c/L$ elektronun salındığı lazer alanının frekansıdır. Yani, Denk. (3.34)'e göre elektronlar ya rezonans enerjisinden ya da senkronize fazdan küçük sapmalar ile periyodik salınımlar yaparlar (Wille, 1996).

3.4. SEL Uygulama Alanları

Serbest elektron lazerleri, sağladıkları yüksek güç, yüksek parlaklık ve kolay ayarlanabilirlik gibi özellikleri sayesinde pek çok bilimsel araştırmada kullanılarak farklı bilim dallarının ilerlemesine katkı sağlamakla birlikte, teknolojinin gelişmesine de öncülük etmektedirler. Dünya çapında hali hazırda faaliyetlerini sürdürmekte olan pek çok tesisin yanı sıra kurulumu devam eden nice tesis bulunmaktadır (UCSB,

2013). Bu kısımda, bu tesislerde bilim insanlarına serbest elektron lazerlerinin sağladığı imkânlar sayesinde mümkün kılınmış olan uygulama alanlarından bazıları anlatılmış ve gerçekleştirilen uygulamalardan bahsedilmiştir.

3.4.1. SEL biyoloji ve medikal uygulamaları

Serbest elektron lazerinin yüksek parlaklık değerinde tutarlı ışınımına sahip olması, bu ışınımın X-ışını ile uzak kızılötesi dalga boyları aralığında bulunması ve sağladığı piko saniye mertebesinde atma gerçekleştirme özelliği biyoloji ve medikal alanlarının somut isteklerine cevap verebilmektedir. SEL'in özellikleri sayesinde mümkün kılınmış olan fotonlar ile canlı hücreler arasındaki etkileşimler neticesinde foto dinamik terapi ve ısıl pıhtılaşma sağlanabilmekte ve ayrıca kanser tedavisi amacıyla kemoterapi aracı olarak da kullanılabilir (Edwards vd., 2005). SEL'lerin insan üzerinde ilk kullanımları literatüre bir beyin tümörünün biyopsisi için gerçekleştirilen operasyon ile geçmiştir. Bundan önceki çalışmalarda ise tavşanlara ait optik sinir zarlarında oluşturulması hedeflenen kesikler, etraflarını saran optik sinirlere zarar verilmeden gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda edinilen bilgi ve tecrübe sayesinde geliştirilen tekniğin halen Vanderbilt Üniversitesinde insanlarda optik sinir zarı tedavisinde kullanıldığı bilinmektedir (Edwards vd., 2003).

3.4.2. SEL kimya uygulamaları

Kompleks kimyasal tepkimelerin detaylı olarak incelenebilmesi ve çok küçük zaman dilimlerinde gerçekleşen kimyasal olayların analizi için 10^{-3} saniye mertebesinde gözlem yapabilecek hızda deneysel teknikler gerekmektedir. Bu doğrultuda kimyasal tepkimeler ya da uygun değişimler gibi çok hızlı gelişen süreçlerin zaman çözömlenmesinde X-SEL ışınımı sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanında bu ışınımın ortalama şiddetinin yüksek olması ve inelastik saçılma metodlarını kullanması; düşük atom numaralı maddelerin araştırılmasında yeni tekniklerin geliştirilmesini sağlamaktadır (Couprie ve Ortega, 2000).

Moleküllerdeki titreşimsel enerji transferleri üzerindeki çalışmalar, moleküler titreşimleri uyaran yüksek güçlü kısa atımlar gerektiren mod seçici kimya gibi yeni bir dizi deney üzerinde çalışmak için olanaklar sağlamıştır.

Ayrıca SEL'lerin 4 – 12 µm aralığındaki değişik soğurma bantları için çalışabilmesi ve tamamen moleküler titreşimlerin uyarılmasına bağlı yüksek güç ve kısa atma gibi özellikleri, dolaylı mod seçici kimya için avantajlı kaynaklar olmasını sağlamaktadır (Couprie ve Ortega, 2000).

3.4.3. SEL nanoteknoloji uygulamaları

SEL'lerin sahip oldukları yüksek pik gücü ve ayarlanabilirlikleri, Berkeley Üniversitesinden Y.R.Shen'in yaklaşık yirmi yıl önce literatüre kazandırdığı ve ara yüzeylerdeki moleküllerin titreşim spektrumlarıyla ilgili olan "Toplam Frekans Oluşumu" (SFG – Sum Frequency Generation) konusunda çalışan yirmiden fazla gruba hizmet ederek yüzey frekans spektroskopisinin gelişmesine öncülük etmiştir (Oh-e vd., 2000).

3.4.4. SEL malzeme bilimi uygulamaları

Madde biliminin araştırma alanlarına dâhil olan polimerlerdeki faz oluşumunun, yeniden yönelimin, kristalleşmenin veya difüzyon gibi önemli işlem süreçlerinin incelenmesinde, X-SEL ışınlarının kullanımı oldukça yaygındır. Bir diğer örnek olarak da nanospektroskopi ile mümkün olmayan fakat SEL'lerin başarıyla gerçekleştirebileceği nanomaddeler hakkında bilgi edinme işlemidir. X ışınlarının çok kısa atmalara sahip olabilmeleri de sert maddelerin içyapılarının araştırılması ile metallerin, alaşımların ve seramiklerin yapısal ve dinamik özelliklerinin araştırılmasında avantaj sağlayan başka bir özelliğidir (Couprie ve Ortega, 2000).

3.4.5. SEL fizik uygulamaları

3.4.5.1. Yoğun madde fiziği uygulamaları

Son yıllarda yoğun madde fiziği araştırmalarında termal olmayan erimenin araştırılması önemli ölçüde yer tutmaktadır. Bu alandaki çalışmalarda, kızılötesi spektrum aralığı kullanılmakta ve uzak-kızılötesi ışınlar yardımı ile özellikle süper iletken ve yarı iletkenler ile diğer pek çok çeşitli malzemenin spektrometresi incelenmektedir. Kolay ayarlanabilirliği ve kısa atma yapısına sahip olmaları

nedeniyle SEL'ler; yarı iletkenler içerisinde meydana gelen elektron-foton ve elektron-elektron etkileşmelerinin spektroskopik olarak incelenmesini de sağlayabilmektedir. SEL'lerin ayarlanabilir özelliği ve yüksek pik gücünün kullanımına bir diğer örnek olarak da Duke Üniversitesindeki kızılötesi ve ultraviyole ışınım sağlayan serbest elektron lazerinin, polimerlerin, yarı iletkenlerin ve kuantum kuyularının lineer olmayan spektroskopik çalışmalarını icra etmek için kullanılıyor olmasıdır (Neil vd., 2003).

3.4.5.2. SEL plazma fiziği uygulamaları

Görünür lazer ışığının düşük etkiye sahip olmasından dolayı, katı hal yoğunluğuna yakın plazmaların araştırılmasındaki gelişmeleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluğun aşılması ancak X-SEL ışınımının kullanılması ile mümkündür. Bu ışınımın sahip olduğu zaman yapısı sayesinde plazmaların hidrodinamik gelişiminin takibi sağlanabilecektir. Ayrıca, ışınımın sahip olduğu şiddetin yeterliliği de zaman çözümlü durumlarda çeşitli plazma parametrelerinin elde edilebilmesi amacıyla spektroskopik incelemelerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. SEL'lerin plazma fiziğindeki en önemli yeri ise, odaklanmış ve 100 eV enerji seviyesinden daha üst enerjilerdeki X-SEL atmalarının 10^6 K'in üzerindeki sıcaklıklarda 1 Gbar basınç sağlanması durumunda katı hal yoğunluklu plazma üretebilecek kapasitede olmasındandır (Saldin vd., 2000).

3.4.5.3. SEL nükleer fizik uygulamaları

SEL'lerin kullanıldığı ve etkinliklerini arttırdıkları bir diğer alan ise nükleer enerji üretimi amacıyla kurulmuş olan nükleer güç reaktörleridir. Gelişen teknolojiye uygun olarak üretilen yeni nesil nükleer güç reaktörlerinde üretilen nükleer atıkların tekrardan işlenebilmesi başta olmak üzere, yeni ve stratejik öneme sahip malzemelerin sentezlenmesi ve zenginleştirilmiş malzemelerin üretilmesi amacıyla SEL'lerin elverişli özellikleri kullanılmaktadır (O'Shea ve Freund, 2001).

3.4.5.4. SEL-çekirdek çarpıştırıcıları

Geleneksel yöntem olarak Nükleer Spektroskopik Floresans (NSF) ile nükleer spektroskopik verilerin incelenmesinde foton demetleri kullanılmaktadır. Fakat son yıllarda bu nükleer spektroskopik verilerin daha hassas bir şekilde incelenebilmesi amacıyla SEL'lerde elde edilen ışınımlar kullanılmaya başlanmıştır. HERA, RHIC ve LCH gibi hadron hızlandırıcılarında; yüksek enerjilere ulaştırılacak tam iyonize çekirdek demetleri ile rölativistik hızlardaki elektron demetlerinin salındırıcıdan geçmesi sonucu etkileşerek üretilen SEL'ler ile çarpıştırılmasını öngören SEL-Çekirdek çarpıştırıcıları sayesinde, mevcut nükleer spektroskopi yöntemlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. SEL'lerin kullanılması sayesinde elde edilen teknik gelişmeler, bu SEL demetlerinin çekirdek çarpıştırıcıları ile birlikte kullanılması sayesinde daha da üst düzeye ulaşacaktır (Aktaş vd., 1999).

Günümüze kadar gerçekleştirilen nükleer fizik deneylerinde çekirdekler durgun hedef olarak kullanılmışlardır. Bu tip deneylerde, çekirdeklerin enerji seviyelerini uyarmak için foton kullanılıyorsa hep aynı enerjili fotonlar, foton kullanılmayanlarında ise hep aynı enerjili parçacıkların kullanılması gerekmektedir. Bu durum, sürekli yüksek enerji değerindeki enerji seviyelerinde kullanılması gereken fotonların ya da parçacıkların üretilmesi oldukça zor ve vakit alıcı olduğundan yüksek enerjili çalışmalara ekstra bir zorluk getirmiştir. Bu nedenle, doğrusal elektron hızlandırıcıları ile üretilen SEL'ler ile LHC, RHIC veya HERA gibi hadron halkalarında hızlandırılan çekirdek demetlerinin çarpıtılmasını amaçlayan SEL-Çekirdek çarpıştırıcılarının nükleer fizik çalışmalarında yeni ufuklar açması beklenmektedir (Koru vd.,2003).

SEL'ler ile elde edilmesi mümkün olan keV mertebesindeki fotonların, durgun haldeki hedef çekirdeğin çerçevesinden MeV mertebesindeki lazer demetleri olarak algılanması ile çekirdeklerin uyarılmış seviyeleri günümüze kadar ulaşılmamış bir hassasiyetle incelenebilecektir. Bunlara ek olarak, SEL ışınımlarının, geleneksel lazerlere göre daha koherent ve monokromatik olması sayesinde çok sık olan yerleşik uyarılma seviyelerinin ve hatta kolektif seviyelerinin de incelenmesi mümkün kılınacaktır. Bu sayede NRF yöntemlerine göre yeni deneysel olanaklar sağlanmıştır

ve teorik olarak bilinen fakat deneysel olarak gözlemlenememiş olan enerji seviyelerinde de çalışmalar yapılabilir (Braun vd., 2005).

3.4.5.5. SEL savunma sanayi uygulamaları

Çeşitli bilim dallarına sağladığı katkı ile sürekli daha fazla değer kazanan SEL'ler, yeni teknolojilerin gelişmesine öncülük etmekte ve bunun sonucu olarak farklı uygulama alanlarına doğrudan ya da dolaylı olarak hizmet vermektedir. Bu alanlardan doğrudan hizmet ettiği bir alan olan savunma sanayinde, SEL'lerin kullanımı, taraflar arasında üstünlüğü belirleyecek bir unsur oluşturmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri Donanması tarafından yürütülen ve varlığı bilinerek geliştirilmeye devam eden projelerden biri olan SEL Silahı projesi bunun bir örneğidir. 2018 yılında tam anlamıyla kullanılmaya başlanması düşünülen sistem, konuşlandığı araca karşı tehdit unsuru oluşturabileceği düşünülen her hangi bir objeyi yok etmeyi amaçlayan yüksek enerji değerinde lazer ışınımı üretebilecek bir SEL kullanmaktadır (Sharma vd., 1997).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmanın bu kısmında, tez başlığına ve amacına uygun olarak, THM TARLA tesisinde faaliyet gösterecek olan serbest elektron lazeri için kurulması planlanan elektron demet hattının sahip olacağı donanımlar belirtilmiş ve tasarımı ifade edilmiştir (Çiftçi, vd., 2005; Özkorucuklu, vd., 2010). Ayrıca, yine çalışmanın amacına yönelik olarak demet parametrelerinin tanımları yapılmış ve bu parametrelerin tesis ile ilgili olan değerleri belirtilmiştir (Yavaş, 2002; Yavaş, 2004; Ataser, vd., 2004). Demet hattı tasarımı kapsamında; demet hattında kullanılan ana donanımlar ve yardımcı donanımlar farklı başlıklar altında açıklanırken, demet parametreleri SEL parametreleri başlığı altında toplanmıştır.

4.1. TARLA SEL Demet Hattı Ana Donanımları

Serbest elektron lazeri ışınımının üretilebilmesi için bazı donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır (Aksoy, vd., 2007; Karşlı, vd., 2008). Ayrıntıları ile takip eden bölümde tanıtılan bu donanımların, SEL ışınımının elde edildiği ve salındırıcı bölgesini de içinde barındıran optik kaviteye kadar olan kısmı, elektron demet hattının temelini oluşturmaktadır. Bu temel demet hattı sayesinde, salındırıcı bölgesini içeren optik kavite bölgesinin eklenmesi yerine farklı kurulumlar ile farklı deneylere imkân tanıyan sistemler oluşturulabilmektedir (Özkorucuklu, 2013). Bu duruma örnek olarak THM TARLA tesisinde kurulması planlanan elektron demet hattında salındırıcı bölgesine girmeden önce bir kısım elektron demetinin Bremsstrahlung deney istasyonuna ayrılması ile bu alanda deneylerin yapılacak olmasıdır. Işınım elde edilmesi ya da farklı deneyler için kurulum yapılması dâhil her durumda değişmeyen durum ise bu donanımların belirli bir sistematik sıra ile yerleştirilmeleri gerekliliğidir. Takip eden alt bölümlerde, bu sistematik yerleşimin serbest elektron lazeri ışınımı üretilmesi amacıyla gerçekleştirilmesi durumuna göre olan sıralama takip edilmiştir.

4.1.1. TARLA elektron tabancası

Elektron tabancası, SEL elde etmek amacıyla kullanılacak olan elektronların üretildiği elektriksel bir cihazdır. Elektron tabancaları, elektronların üretildiği katod

ve odaklandığı elektrotlar olmak üzere iki kısımdan oluşurlar (Herrmannsfeldt, 1989).

Sınıflandırılmalarında ise, hızlandırma gereksinimleri (doğru akım veya radyo frekansı), elektron yayma mekanizmaları (termiyonik, fotokatod, soğuk emisyon vb), elektronları odaklama şekilleri (elektrostatik ya da manyetik alan) ve elektrot yapıları gibi özellikleri dikkate alınır. Elektron demeti üretim mekanizmalarına göre elektron tabancaları, termiyonik ve fotokatod olmak üzere ikiye ayrılırlar. THM TARLA projesi kapsamında kurulması planlanan serbest elektron lazeri, istenilen özelliklerde ışınım üretilmesi amacıyla termiyonik bir elektron tabancasına sahip olacaktır. Termiyonik elektron tabancasının işleyişi ise aşağıda verilmiştir.

Katotta bulunan elektronlar, genel olarak yüzeye yakın yerde birikirler. Katot ısıtıldığı zaman, elektronlar bağlı oldukları atomları bırakmaya yönelirler ve maddeden tesirli olarak sökülürler. Isıtılan bu katod yüzeyinden çıkan elektronların oluşturduğu maksimum akım yoğunluğu Richardson/Dushman denklemi ile hesaplanabilir (Humphries, 1986).

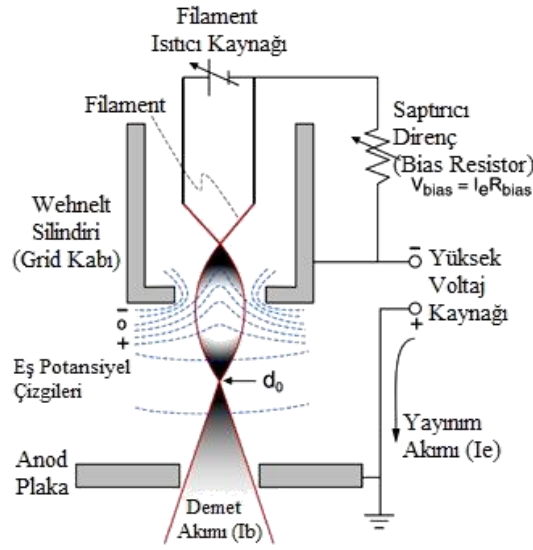
$$J = B_0 \times T^2 \times e^{(\Phi/kT)} \text{ Amper/cm}^2 \quad (4.1)$$

$$B_0 = \frac{4\pi e m_e k^2}{h^3} = 120 \text{ Amper / (cm K)}^2 \quad (4.2)$$

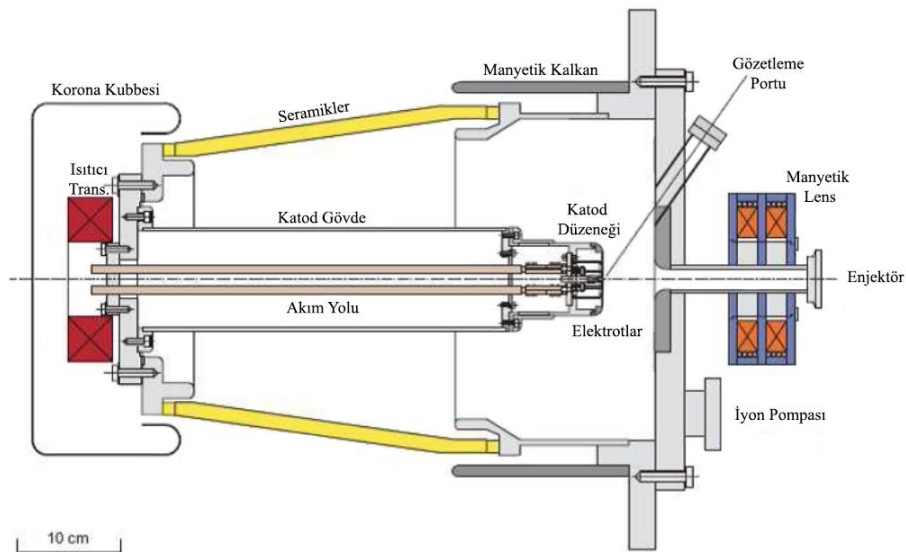
Burada; J, maksimum akım yoğunluğunu ifade ederken, T, Kelvin cinsinden sıcaklığı, B_0 , 120 Amper / (cm K)² lik teorik değere sahip Richardson-Dushman sabitini, Φ , ise, eV cinsinden metalin katekteristik özelliği ve yüzeyinden elektron koparmak için gerekli olan en küçük enerjiyi belirten değer olan iş fonksiyonunu temsil eder. Boltzmann sabitini ifade eden k'nın değeri ise literatürde 1.371×10^{-23} Joule / Kelvin olarak kabul edilmiştir (Delereu, 2009).

Termiyonik elektron tabancası Şekil 4.1'de görselleştirilmiş ve Şekil 4.2'de Spring-8'de kullanılan SCSS termiyonik tabancasının diagramı verilmiştir (Delereu, 2009).

Termiyonik tabanca, katottan (filamentten) çıkan elektronların, pozitif potansiyel tarafından aşağıya (anoda) doğru hızlandırılması prensibiyle çalışır. Bu elektronlar anodun etkisiyle aşağıya doğru hareket ederken negatif potansiyelli olan ve grid kabı olarak bilinen Wehnelt silindiri ile ortaya doğru püskürtülür. Bu durumun sonucunda elektronlar Wehnelt kapağı ile filament (katot) ucu arasında birikir. Biriken bu yüklere uzay yükü denir. Uzay yükünün altındaki elektronlar anoda yakın bölgede olduğundan Wehnelt kapağının ucundaki delikten çıkarak tabanca alanını terk ederler (Delereu, 2009).



Şekil 4.1. Termiyonik elektron tabancası şematik gösterimi (NHML, 2012)



Şekil 4.2. Spring-8 SCSS termiyonik elektron tabancası diyagramı (Delereu, 2009)

TARLA tesisinde kullanılacak DC termiyonik elektron kaynağı; Almanya'nın Dresden kentinde bulunan HZDR (Helmholtz - Zentrum Dresden Rossendorf) araştırma merkezinin sahip olduğu ELBE (Electron Linac for Beams with High Brilliance and Low Emittance) tesisinde on yıldan uzun süredir kullanılmakta olan elektron tabancası ile aynı yapıya sahiptir (HZDR, 2013).

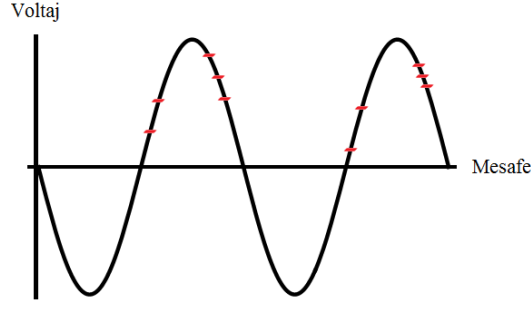
Bu cihaz, atmalı yapıdaki bir termiyonik kaynak ve sonrasına yerleştirilmiş bir elektrostatik hızlandırıcıdan oluşmaktadır (Aksoy, 2013). Bu termiyonik kaynak 250 kV katot voltajı ile çalışmaktadır ve sonrasında yerleştirilmiş olan iki adımlı hızlandırıcı yapı sayesinde üretilen elektronlar 250 keV enerjiye kadar çıkarılabilmektedirler (Aksoy, 2013). Kaynağın sahip olduğu 8 mm çapındaki katodun önüne yerleştirilmiş 200 µm'lik ızgara sayesinde 500 ps uzunluğunda elektron demetleri elde edilebilmektedir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2013).

Bu termiyonik elektron tabancası, TARLA tesisinde SEL elde etmek amacıyla 77 pc paketçik yükü ve 13 MHz tekrarlama frekansına sahip 1 mA demet yüklü elektron demetleri üretmek amacıyla kullanılacaktır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

4.1.2. TARLA paketleyiciler

Paketleyici olarak adlandırılan ve RF (radyo frekansı) oyuklarının amacı, elektron tabancası ile üretilen elektron demetlerini paketleyerek, frekans değerlerini değiştirmek ve dalga boylarının bu sayede küçülmesini sağlayarak demetleri şekillendirmektir (Chao ve Tigner, 1999).

Kaynaktan; yani, elektron tabancasından çıkan uzun sürüklenme süresine sahip olan elektronlar, paketleyici ya da ön paketleyici olarak adlandırılmış birincil RF oyuklarına iletilirler. Burada elektronlar, ana hızlandırıcı kavitenin (oyuğun) temel çalışma frekansı ile uyumlu olarak salındırılan bir RF alanına yani klistron ya da katı hal cihaz üreteçlerinden üretilen mikro dalga radyasyonuna maruz bırakılırlar (Chao ve Tigner, 1999).



Şekil 4.3. Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar

Şekil 4.3’de paketleyici içindeki mikrodalga radyasyon, sinusoidal dalga şeklinde gösterilmiştir. Bu şekilde gösterilen kırmızı noktalar ise paketleyici içerisindeki elektronları temsil etmektedir. Elektronlar, dalganın tepesinde iken dalgadan daha fazla enerji alırlar ve daha fazla hızlanırlar. Dalganın alçak seviyelerinde bulunan elektronlar ise, geride kalan paketçik ile birlikte olmak için hızlarını yavaşlatırlar ve elektron paketçığıne geri çekilirler. Böylece mikrodalganın etkisiyle paketçikler biçimlenmeye, birbirlerine yaklaştırmaya ve bir form oluşturmaya başlarlar (Wiedemann, 1993).

Paketleyiciler sahip oldukları RF frekansı hızlandırıcı sistemlerinin çalışma frekansı ile uyumlu olmalıdır. Bu RF dalga boyu Denk. (4.3) ile şu şekilde verilmektedir.

$$\lambda_{RF} = \frac{v}{f_{RF}} = \frac{2\pi c}{\omega_{RF}} \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte ω_{RF} ; RF açısal frekansını, f_{RF} ; RF alanının dalga boyunu ve c ise ışık hızını temsil etmektedir. Elektron paketçığının, paketleyici tarafından tam anlamıyla şekillendirilerek sıkıştırılabilmesi için $\lambda_{RF} > \sigma_s$ koşulu aranmaktadır. Burada σ_s kaynaktan üretilen paketçığın sahip olduğu uzunluğu tanımlamaktadır. Kesim 4.1.1’de, TARLA tesisinde kullanılacak olan termiyonik elektron tabancası ile üretilecek paketçiklerin 500 ps sürüklenme sürelerine sahip olacakları yani uzunluklarının (σ_s) 500 ps olacağı açıklanmıştır. Bu paketçikler düşünüldüğünde basit bir hesap ile en az 250 MHz frekansa sahip bir paketleyici yardımı ile sıkıştırılmaları gerektiği anlaşılmaktadır. Bu frekans değerinin daha fazla artırılması yada kullanılan RF yapının dalgaboyunun azaltılması durumunda RF dalga boyu paketçik uzunluğunu aşacak dolayısıyla da paketçik iki kısma ayrılacaktır.

Bu tip hataların engellenmesi için benzer şekilde termiyonik elektron tabancası kullanılan tesislerde genellikle iki kademeli paketleyiciler kullanılmaktadır (Aksoy, 2013).

TARLA tesisi de elektron kaynağı olarak termiyonik elektron tabancası kullandığından, üretilen paketçikler hızlandırıcıya girmeden önce iki kademeli paketleyici sistemden geçirilirler. Bunlardan ilki SHB olarak adlandırılan 260 MHz'lik subharmonik (altharmonik) paketleyici, diğeri ise FB olarak adlandırılan 1.3 GHz'lik ana paketleyicidir. Bu paketleyicilerden her ikisi de normal iletkenlerdir. SHB'nin kavite uzunluğu 40 cm iken kavite yarıçapı 20 cm'dir ve bu paketleyici 1 kW RF gücüne ihtiyaç duymaktadır. FB ise, 60 mm kavite uzunluğuna ve 131 mm kavite içi boyutuna sahiptir. Operasyonu için 200 W'lık maksimum RF gücüne ihtiyaç duyulmaktadır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011; HZDR, 2013)

4.1.3. TARLA hızlandırıcılar

Hızlandırıcılar, elektron tabancasında üretilen ve paketleyiciden geçen elektronların bir sonraki durağıdır. Burada elektron demetleri halinde, salındırıcıya girmeden önce rölativistik hızlara ulaşmalarını sağlayacak şekilde hızlandırılırlar. Çizelge 4.1'de SEL üretiminde oldukça yaygın olarak kullanılan parçacık hızlandırıcılarının enerji aralıklarında dahil olmak üzere bazı özellikleri ve bu cihazların kullanılmaları sonucunda elde edilebilecek SEL dalgaboyları gösterilmiştir (Yiğit, 2007).

Çizelge 4.1. SEL üretiminde kullanılan hızlandırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri

	Enerji	Pik Akımı	Atma Uzunluğu	SEL Dalgaboyu
Elektrostatik Hızlandırıcı	1 - 10 MeV	1 - 5 A	1 - 20 μ s	mm - 0,1 mm
İndüksiyon Hızlandırıcı	1 - 50 MeV	1 - 10 kA	10 - 100 ns	cm - μ m
Depolama Halkası	0,1 - 10 GeV	1 - 1000 A	30 ps - 1 ns	1 μ m - nm
RF Doğrusal Hızlandırıcı	0,01 - 25 GeV	100 - 5000 A	0,1 - 30 ps	100 μ m - 0,1 nm

TARLA serbest elektron lazerinde, Çizelge 4.1'de gösterilen hızlandırıcı çeşitlerinden RF doğrusal hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Bu tip cihazlarda, hızlandırma işlemi doğrusal bir yol boyunca sıralanmış bir veya birden fazla RF rezonans boşluğu (kavite) ile gerçekleştirilir. Bu kavitelerin oluşturduğu hücrelerin, ihtiyaçlar doğrultusunda birçoğunun bir araya getirilmesi ile büyük enerji aktarımlarının sağlanabildiği uzun hızlandırıcı sistemleri oluşturulabilmektedir. Doğrusal ve dairesel olarak tasarlanabilecek olan hızlandırıcılardan doğrusal olanının kullanılmasının en büyük avantajı, dairesel hızlandırıcılarda sinkrotron ışınımından dolayı oluşan enerji kaybının olmaması ve pahalı bükücü mıknatıs ve bunlarla alakalı yan sistemlerin kullanımına ihtiyaç duyulmamasıdır (Wangler, 2008).

Ayrıca; doğrusal hızlandırıcı sistemlerinde, parçacıkların enjekte edilmesi ve ayrılması için dairesel hızlandırıcılara kıyasla daha basit sistemler kullanılabilir (Wangler, 2008).

Hızlandırıcılar; normal iletken (Nİ) ya da süper iletken (Sİ) yapılara sahip olabilirler. Süper iletken yapılar enerjinin % 90'dan fazlasını hızlandırılacak parçacığa aktarabilirken, normal iletken yapılarda bu değer yaklaşık olarak % 1'dir. Bu nedenle VUV ve X-ışını dalga boyları aralığında SEL üretilebilmek amacıyla doğrusal hızlandırıcılarda süper iletken RF kavite kullanılmaktadır (Chao ve Tigner, 1999). Şekil 4.4'de 9 hücreli süper iletken Nb (Neobyum) kavite gösterilmiştir.



Şekil 4.4. 9 hücreli süper iletken Nb kavite (Linearcollider, 2012)

Yaklaşık olarak 2 K sıcaklıkta çalışan yüksek güce sahip süper iletken RF hızlandırıcılar, oda sıcaklığından daha düşük değerlerde çalışmaları için helyum soğutma sistemlerine ihtiyaç duyarlar. Süper iletken yapılarda kaybın neredeyse sıfır olması sayesinde hem sürekli hemde atmalı modda RF ile çalışılabilmekte ve bir metrede 10 – 20 MV arasında enerji aktarımı yapılabilmektedir. Bu cihazların

çalışabilmeleri için kW mertebesinde RF güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır (Humphries, 1986).

Süper iletken hızlandırıcılarda; atmalar mikro paket yapısında olduğundan elde edilen pik akımı düşük, ortalama akım ise yüksektir. Bunun nedeni cihazın demet oluşturmasını belirleyen ve duty faktör olarak adlandırılan kesir zamanı ile alakalıdır. Süper iletken yapılarda sürekli modda duty faktör 1 iken atmalı yapıda daha yüksektir. Bu sayede daha fazla paketçik hızlandırılabilen ve ortalama akım yüksek olmaktadır (Humphries, 1986).

Normal iletken hızlandırıcılar ise, oda sıcaklığında çalışırlar ve bu yüzden maliyetleri düşüktür. Muhtemel kayıplardan ötürü sadece atmalı RF yapısı kullanılabilir ve bir metrede maksimum 50 MV enerji aktarımı yapılabilir. Bu cihazlar MW mertebesinde RF güç kaynaklarından beslenirler (Humphries, 1986).

Normal iletken hızlandırıcılarında, atmalar makro yapıda olduğundan yüksek değerlerde pik akımı oluşmaktadır. Fakat bütün RF kavimleri paketçik ile doldurulmasına rağmen, az sayıda paketçik hızlandığından dolayı, ortalama akım düşüktür. Hızlandırılmış makro paketçik yükü ise, yüksek değere sahiptir (Dattoli vd., 1993).

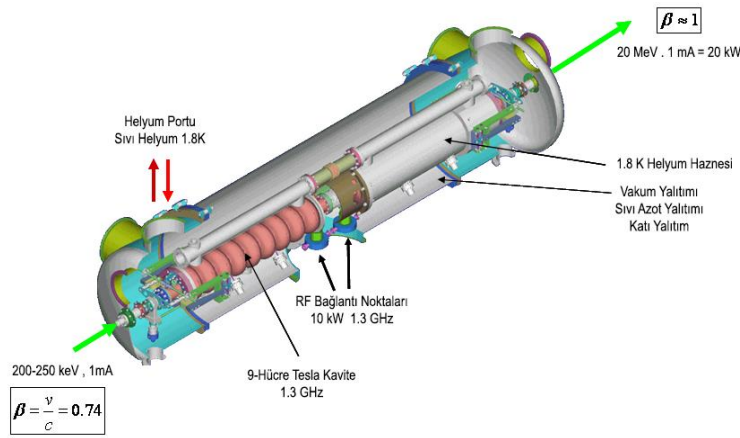
Normal iletken hızlandırıcılarda birçok paket bulundurmanın sebebi elektron demetinin dolayısıyla lazer demetinin ortalama gücünü arttırmaktır. Bu hızlandırıcılardaki sık tekrarlama oranı süper iletken 13 MHz olabilirken, normal iletken 1 GHz dir. Süper iletken hızlandırıcılarında elde edilen lazerin ortalama gücü; normal iletken elde edilen lazerden yaklaşık 100 kat daha fazladır (Wangler, 2008).

TARLA tesisinde amaçlanan 3 – 250 μm dalga boyu aralığında SEL elde edilebilmesi için 15 – 38.5 MeV aralığında hızlandırılmış elektron demetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hedef doğrultusunda, CERN, CEA, DESY, FNAL, INFN gibi dünyanın önde gelen araştırma merkezinden bilim insanlarının ortak çalışmaları sonucunda geliştirilmiş olan TESLA tipi süper iletken kavimlerden 9 hücreli olanı

kullanılacaktır. TESLA kavileri sürekli modda çalışabilmektedir ve bir metrede yaklaşık olarak 10 MeV'lik enerji aktarımına sahiptirler (Wangler, 2008).

TARLA tesisinde, belirlenen parametrelere göre 38.5 MeV enerjili elektron demeti elde edebilmek için bu 9 hücreli TESLA tipi kavilerinden dört adet kullanılması gerekecektir. ELBE tesisi için tasarlanmış ve Şekil 4.5'de gösterilmiş olan niyobyum malzemedan üretilen süper iletken, 9 hücreli iki kavite içeren hızlandırıcı modülden iki adet kullanılması ile TARLA'nın ihtiyacı olan 15 – 38.5 MeV aralığında elektron demetleri üretilebilecektir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011; HZDR, 2013).

Toplam uzunluğu 3.26 metre olan ve sürekli modda çalışırken 10 kW'lık RF gücüne ihtiyaç duyan bu modüllerin helyum soğutma sistemlerinin tasarımı ELBE tarafından yapılmıştır. Bir metrede 15 – 20 MV hızlandırmaya olanak sağlayan bu modüllerin üretimleri Research Instruments firması tarafından HZDR ile yapılan lisans anlaşmaları ile yapılmaktadır (RI, 2013).



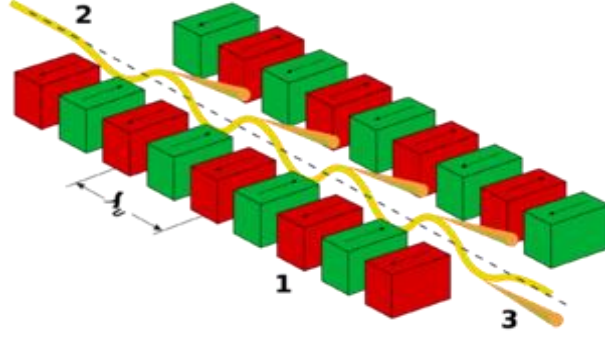
Şekil 4.5. Çift oyuklu RF hızlandırıcı modül (HZDR, 2013)

4.1.4. TARLA salındırıcılar

Salındırıcı; hızlandırıcıdan çıkan elektron demetinin sinusoidal bir hareket yapmasını sağlamak amacıyla iki kutuplu (dipol) mıknatısların ana eksen boyunca eşli dizi şeklinde sıralanması ve g (gap) aralığı ile birbirlerinden ayrılmasıyla oluşturulmuş yapılardır. Salındırıcının en önemli etkeni manyetik alandır. Manyetik alan,

elektronların izlediği yolu dikine bir doğrultuda bükerek bir döngü meydana getirir ve böylece elektron demeti salındırıcı boyunca sinusoidal bir dalga gibi hareket ederler (Onuki ve Elleaume, 2004).

Şekil 4.6’da bir salındırıcı sistemi gösterilmiş ve bileşenleri isimlendirilmişken Şekil 4.7’de ise, örnek salındırıcı görselleri sunulmuştur.



Şekil 4.6. Salındırıcı bileşenleri 1.Mıknatıslar, 2. Elektron demeti 3. Elektronun titreşim hareketi $\lambda_u \rightarrow$ Salındırıcı dalga boyu (mıknatıslar arası mesafe) (Wikimedia, 2012)

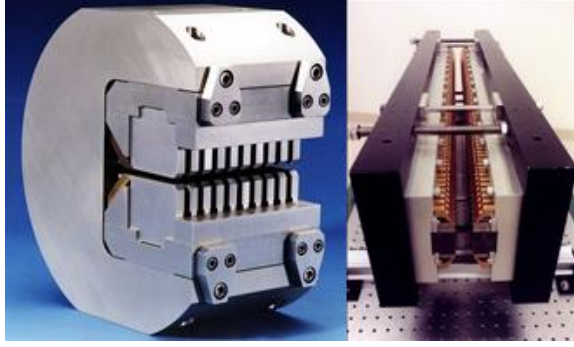
Salındırıcı şiddeti K , elde edilecek lazerin dalgaboyunu doğrudan etkiler ve Denk. (4.14) ile verilir (Wille, 1996).

$$K = \frac{eB_0}{k_u m_e c} = 0,934 \cdot B_0 [\text{Tesla}] \cdot \lambda_u [\text{cm}] \quad (4.4)$$

Bu denklemde k_u ; salındırıcı dalga sayısıdır ve $k_u = 2\pi/\lambda_u$ denklemi ile hesaplanır. B_0 , salındırıcı kutupları arasındaki manyetik alan ve λ_u , salındırıcı dalga boyunu iken oluşacak lazerin dalgaboyu pratik birimler cinsinden Denk. (4.5)’deki gibi verilir (Wille, 1996).

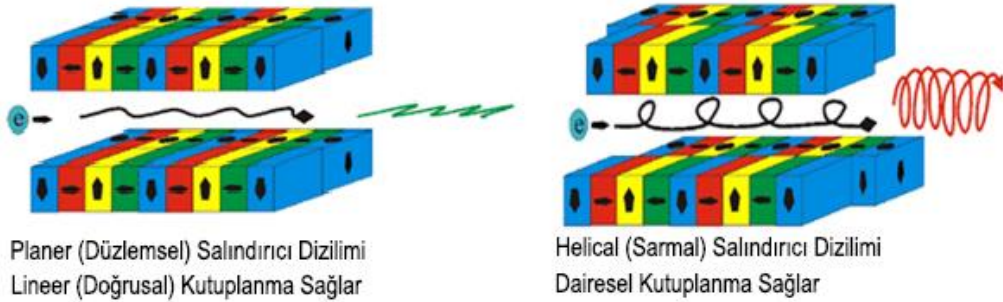
$$\lambda_{\text{lazer}} = 13,056 \frac{\lambda_u [\text{cm}]}{E^2 [\text{GeV}]} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte; λ_{lazer} üretilecek olan ışınımın dalgaboyunu temsil etmekte iken K salındırıcı şiddetini, λ_u , salındırıcı dalga boyunu ve E ise GeV cinsinden enerjiyi temsil etmektedir.



Şekil 4.7. Salındırıcı fotoğrafları (SLAC ve JLAB, 2012)

Çeşitli tiplerde salındırıcı mıknatısların değişik şekillerde kombinasyonları ve eksenleri boyunca uygulanan manyetik alanların değiştirilmesiyle farklı kutuplanmalar sağlanabilir. Salındırıcılarda kutuplanma planar (düzlemsel) ve helical (sarmal) olmak üzere iki çeşittir. Şekil 4.8'den de anlaşılacağı gibi planar salındırıcılarda elektron demeti zigzag şeklinde ilerlerken helissel salındırıcılarda sarmal şeklinde yol almaktadır (Scott, 2003).



Şekil 4.8. Düzlemsel ve sarmal salındırıcı dizilimleri (Mete, 2006)

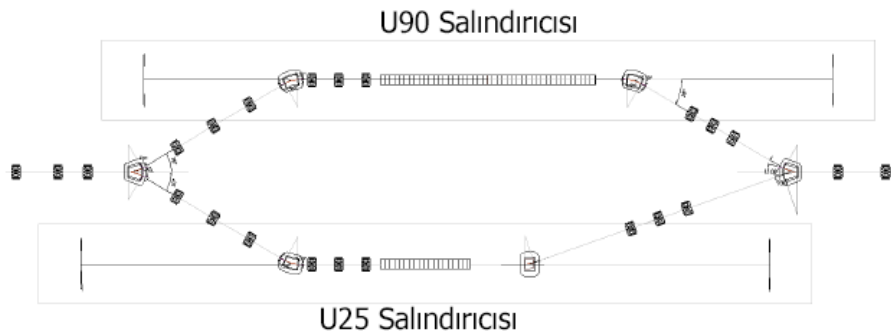
TARLA tesisinde 25 mm ve 90 mm periyodlarına sahip iki salındırıcı kullanılması uygun bulunmuştur. Bu salındırıcılardan 25 mm periyoda sahip olanı U25, 90 mm periyoda sahip olanı ise U90 olarak isimlendirilmiştir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Bu salındırıcıların tasarımları; çelik bloklar içerisinde NdFe materyalinden üretilecek mıknatıslar olarak düşünülmektedir. Bu sayede üretim maliyetinde düşürülmüş olacaktır. Çizelge 4.2'de TARLA tesisinde kullanılacak olan salındırıcıların

özellikleri verilmiştir, Şekil 4.9’da ise TARLA tesisinin salındırıcı kısmının çizimleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. TARLA Salındırıcı Parametreleri

Parametre	U25	U90
Salındırıcı Miknatıs Materyali	NdFe	NdFe
Salındırıcı Periyodu (cm)	2.5	9
Salındırıcı Uzunluğu (m)	1.68	3.6
Periyot Sayısı	60	40
Magnetik Açıklık g (cm)	1.5	4
Efektif Manyetik Alan (T)	0.35	0.42
Salındırıcı Şiddeti K	0.71	2.5



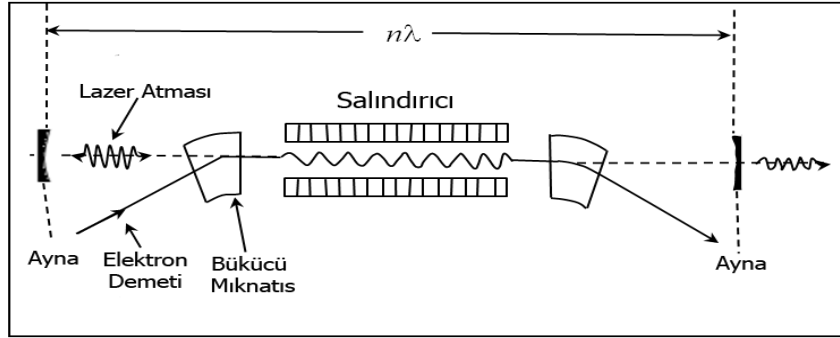
Şekil 4.9. TARLA tesisi salındırıcı kısımları (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

U25 ve U90 salındırıcılarının sahip olabilecekleri K parametreleri ise, Denk. (4.4) ile hesaplanmıştır. Bu hesaplama işlemi yapılırken U25 salındırıcısı için magnetik alan değeri 0.35 T olarak kabul edilmiş iken U90 salındırıcısı için ise 0.33 T olarak alınmıştır. Bu büyüklüklerle U25 için K parametresi 0.81725 olarak hesaplanmışken U90 için K parametresi 2.77398 olarak hesaplanmıştır.

4.1.5. TARLA optik kavite

Bir optik kavite, kazanç ortamının iki ucuna yerleştirilen ve eğim yarıçapları ihtiyaçlara göre tasarlanan iki aynadan oluşmaktadır. SEL optik kavite, geleneksel lazerlerin optik kavite ile birçok benzer özelliğe sahip oldukları gibi, aynı

zamanda onları farklı kılan bazı karakteristik çalışma özelliklerine de sahiptirler. Optik kavite içerisinde lazer dalgası iki küresel ayna arasında pek çok kez yansıtılır ve lazer dalgası ile elektron demeti arasında enerji alışverişi gerçekleşir. Şekil 4.10'da bu düzen şematik olarak gösterilmiştir (Wille, 1996).



Şekil 4.10. Optik kavite sistemi (Wille, 1996)

SEL osilatöründe lazer alanı ile elektronun etkileşimi sonucunda enerji değiş tokuşu, ışınım alanının yükseltgenmesine ve elektron demetinin yavaşlamasına (pozitif kazanç) ya da ışınım alanının azalmasına ve elektron demetinin hızlanmasına (negatif kazanç) neden olabilir. Pozitif kazanç gerçekleştiğinde elektron demeti enerjisini lazere aktarmış olmaktadır. Pozitif ya da negatif kazancı elektron demeti ile ışınım alanındaki faz belirler. Her salıncıdan geçişteki lazer alanına aktarılan radyasyon enerji miktarı, elektronların salıncıdan geçmeden önceki radyasyon enerjisi E_i ve kazanç faktörü G ile şu şekilde ifade edilir (Ortega, 2000).

$$\Delta E = G \cdot E_i \quad (4.6)$$

Bir çift ayna ve salıncı ile oluşturulan optik kavite, ard arda üretilen koherent ışınımı biriktirir. Kavite içerisinde, ışının gidiş dönüşlü hareketlerinden her birinde, kullanılabilir elektron paketçikleri vardır. N tane dönüşlü turdan sonra, toplam güç kazancı $G_{\text{toplam}} = G^N$ eşitliği sonucunda elde edilen değerden daha büyük olmadığı gibi, bu sonuç çok büyük sayılara karşılık gelebilir. Bu işlemin sonucunda optik kavitede depolanmış çok fazla ışınım enerjisi oluşur (Ortega, 2000).

SEL'in yüksek verimlilikte ve kaliteli özellikte olması için, optik kayıplar çok küçük olmalıdır. Bunu sağlamak için de optik demet ile elektron demeti birbiriyle iyi örtüşmeli ve tekrarlama frekansına bağlı olarak değişen kavite uzunluğu iyi ayarlanmalıdır (Hodgson ve Weber, 2005).

Kavitede kullanılan aynaların yüzeyi dielektrik malzemelerle kaplanabileceği gibi doğrudan metal aynalarda kullanılabilir. Eğer, ayna yüzeyleri dielektrik malzemelerle kaplanırsa, termal ısınmalarla ayna karakteristiği değişecek ve buda SEL karakteristiğini olumsuz yönde etkileyecektir. Altın ve gümüş kaplı aynaların her ikisinde de kazanç aralığı aynı değere sahiptir. Burada dikkat edilmesi gereken ısıya daha dayanıklı olanın daha fazla avantaj sağlayacak olmasıdır (Hodgson ve Weber, 2005).

Eğer aynalar metalik ise, aynanın arkasındaki su soğutucusu yada soğutma amaçlı kullanılacak su kanalları daha iyi bir soğutma sağlayacağı için daha verimli olabilmektedir. Bu olay tam yansıtma sağlayan ayna için kullanılabilir. Ortasında zayıflatılmış bir bölge bulunan aynalarda, ayna hasarlarından kaçınılabılır ve soğutucuya gerek kalmayabilir (Hodgson ve Weber, 2005).

TARLA tesisinde kurulması planlanan SEL sisteminin yükselteç modda çalışan bir sistem olması planlanmaktadır. Bu doğrultuda iki aynalı, simetrik ve ortak merkezli bir optik kavite sistemi kurulması planlanmaktadır.

Bu amaçla kurulacak olan optik kavitenin uzunluğu 11.53 metre olarak Denk. (4.7)'de gösterilen eşitlik ile hesaplanmıştır (Thompson, 2013).

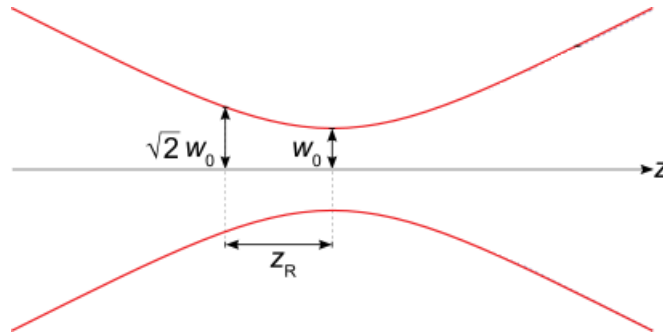
$$L_c = \frac{c}{2f} \quad (4.7)$$

Bu eşitlikte L_c optik kavitenin uzunluğunu, c ise ışık hızını ifade etmektedir. Minimum paketçik aralığını ifade eden f 'in değeri ise TARLA serbest elektron lazeri için 13 MHz'dir.

Simetrik ve ortak merkezli optik kavitelere; kararlı ve kaliteli ışınım elde edilmesi için ihtiyaç duyulan Rayleigh uzunluğu, salındırıcı uzunluğunun yarısı kadardır. Bu durumda gerekli olan Rayleigh uzunluğu Denk. (4.8)'de gösterilen eşitlik ile hesaplanır.

$$Z_R = \frac{L_u}{2} \quad (4.8)$$

Bu eşitlikte Z_R Rayleigh uzunluğu ifade etmektedir. Rayleigh uzunluğu; serbest uzayda, z ekseninde ilerleyen bir Gaussian demeti için, demet kalınlığının demetin ilerleme yönünde $\sqrt{2}$ katı kadar arttığı uzaklık olarak ifade edilir. Şekil 4.11'de Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi sunulmuştur (Damask, 2004; Wikipedia, 2013).



Şekil 4.11. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi (Wikipedia, 2013)

Denklem (4.8)'de gösterilen L_u ise salındırıcı uzunluğunu ifade etmektedir. Salındırıcı uzunluğu, salındırıcıdaki periyot sayısı ile miknatıs periyot uzunluğunun çarpımı sonucu elde edilmektedir ve U90 salındırıcısının uzunluğunun 3.6 metre iken U25 salındırıcısının uzunluğunun 1.68 metre olarak hesaplandığı bir önceki bölümde gösterilmektedir. Bu durumda U90 salındırıcısı için Rayleigh uzunluğu 1.8 metre ve U25 salındırıcısı için ise yaklaşık 0.75 metre olarak hesaplanır.

Her iki salındırıcı sisteminde de, maksimum kazanç elde etmek amacı ile farklı eğrilik yarıçap değerlerine sahip aynalar kullanılacaktır. Bu aynalar için eğrilik yarıçapı hesabı Denk. (4.9)'da gösterilen eşitlik ile yapılır .

$$R = \left((4Z_R^2/L_C) + L_C \right) / 2 \quad (4.9)$$

Bu denklemde; R aynaların eğrilik yarıçapını, Z_R Rayleigh uzunluğunu, L_C ise optik kavitenin uzunluğunu ifade etmektedir. U25 ve U90 için optik kavite uzunluklarının aynı olmasına rağmen, farklı eğrilik yarıçaplarında aynaların kullanılması Rayleigh uzunluğu ile ilişkilidir. Bu durumda kullanılacak olan aynaların eğrilik yarıçapları U25 için 5.86 metre ve U90 için ise 6.32 metre olarak hesaplanmıştır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

U25 ve U90 salındırıcıları için kurulacak olan optik kavite her ikisinde de, altın ya da bakır ile kaplı yansıtıcı yüzeyler kullanılacaktır. Oluşan ışınım ise; optik kavite dışına, aynalardan ışınımın çıkış tarafında olanına açılan 0.5 ile 2 mm arasında delikler ile alınacaktır.

4.1.6. TARLA demet durdurucu

SEL ışınımı elde etmek amacıyla yüksek hızlara çıkarılan elektron demetlerinin salındırıcı sistemini de içinde barındıran optik kaviteden ışınım elde edildikten sonra sistemden güvenli bir şekilde çıkarılarak durdurulması gerekmektedir. Her ne kadar ışınım elde edilmesi süresinde enerjilerinin bir kısımlarını kaybetseler bile, bu elektron demetleri hala yüksek enerjiye sahiptirler. Bu nedenle kullanılacak olan demet durdurucu sistemi oldukça önemli bir sistemdir.

Elektron demetlerinin durdurulduğu sistemler demet durdurucu sistemlerdir ve “Electron Dump” olarak isimlendirilirler.

Demet durdurucu sistemlerin üretildikleri malzeme ve geometrik yapıları, durdurulmak istenen demetin enerjisi ve gücü gibi özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Demet durdurucular doğrusal yapıda olabilecekleri gibi silindirik yapıda da olabilirler. Üretildikleri malzemeler ise genellikle alüminyum, bakır, karbon ve berilyumdur (NCR, 2009).

Genellikle kullanılan demet durducular, silindirik bir çekirdek yapı ve bunu çevreleyen kurşun zırhlamadan oluşmaktadır. Bu kurşun zırhlama oluşan ikincil elektronların, nötronların ve radyasyonun durdurulması için kullanılmaktadır. Eğer bu kurşun zırhı aşan enerjik nötronlar gözlenirse fazladan beton zırhlama da kullanılmaktadır. Bu sayede demetin kendisinin ve oluşturduğu ikincil etmenlerin zararları tamamiyle yok edilebilecektir .

TARLA tesisini için ise düşük nötron üretimi nedeniyle karbon malzemedan imal edilecek silindirik bir demet durdurucu tasarlanmıştır. Bu demet durdurucu, 5 cm yarıçapa ve demetin ilerleme yönünde 20 cm uzunluğa sahiptir. Demet durdurucunun tam ortasında ise demetin çarpacağı 2.5 cm yarıçaplı ve 2.5 cm uzunluklu konik bir açıklık bulunacaktır. Bu sayede oluşması muhtemel ikincil parçacıklar da demet durdurucunun içerisinde kalacak ve soğurulacaklardır. Bu tasarımın kurşun ile zırhlanması ile de zararlı tüm etkiler ortadan kaldırılacaktır (Biçer, 2012).

4.2. TARLA SEL Demet Hattı Yardımcı Donanımlar

Bir SEL sisteminin çalışması için gerekli olan ana donanımlar bir önceki bölümde açıklanmıştır. Bu cihazların ve sistemin tam anlamıyla sorunsuz ve yüksek verimlilikte çalışmaları için en az ana donanımlar kadar önemli olan bazı yardımcı donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar; vakum, güç, soğutma, tanılama ve kontrol sistemleridir. Bu kısımda bu yardımcı donanımlar tanımlanarak TARLA tesisinde kullanılan donanımların karakteristik özellikleri verilmiştir.

4.2.1. TARLA Vakum sistemi

Elektronların rölativistik hızlara çıkarken enerji kayıplarına uğramamaları için vakum sistemlerinin gerekliliği kesindir. Değişik tipteki hızlandırıcılarda, hızlandırıcı tiplerine bağlı olarak performansı etkileyen ve ışın kayıplarına neden olabilecek birçok etken bulunabilir. Bu etkenlerden en önemlisi ışın yollarında kalan artık gaz moleküllerinin ışınlar ile etkileşmesidir. Bu etkileşmeler sonucu elektron kaybı, ışın ömrünün kısalması ve yüksek enerjili ikincil parçacıkların (fotonlar, nötronlar vb...) oluşması muhtemeldir. Bu nedenle elektron demeti, hareketinin tamamını vakumlu bir ortama gerçekleştirmek zorundadır (Dylla vd., 1999).

Vakum elde edebilmek için farklı özelliklere sahip vakum pompaları kullanılabilir. 1 atmosfer ile 10^{-3} Torr aralığında vakum elde etmek için kaba (rough) olarak da adlandırılan mekanik pompalar kullanılırken 10^{-6} Torr vakum için turbo moleküler pompalar (TMP) kullanılmaktadır. Kullanılan vakum sistemleri ışın kararlılığı ve ışının ömrünün uzun olmasını sağlayacağı için oldukça önemlidirler (Turner, 1999).

TARLA tesisinde ise elektron tabancasından itibaren optik kavitenin sonuna kadar 10^{-8} Torr'da ultra yüksek vakuma ihtiyaç duyulmaktadır ve bu ihtiyaç iyon pompaları (IP) ile sağlanacaktır. İyon pompaları genellikle tüm gazları aynı seviyede vakumlayabilirler ve herhangi bir noktaya monte edilebilirler. Ayrıca herhangi bir havalandırma veya güç kaybı durumları nedeniyle sistemden izolasyon vanaları ile ayrılmalarına gerek yoktur.

Tesisin elemanları düşünüldüğünde; elektron tabancası ve paketleyiciler için 10^{-9} Torr mertebesinde vakuma ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu sayede elektronların demet hattı içerisindeki artık gaz molekülleri ile etkileşimleri ve kayıplar engellenmiş olacaktır. Bu mertebedeki vakum ise öncelikle kaba pompalar ve sonrasında TMP'ler ile 10^{-7} Torr'a kadar vakum alınması takibinde ise IP'lerin çalışması ile sağlanacaktır. Elektron tabancasından itibaren hızlandırıcı modüllerine kadar olan kısımda toplam 4 IP ve 3 TMP kullanılması öngörülmektedir.

Hızlandırıcı modüllerinde ise farklı bir durum söz konusu olmaktadır. Modül içerisinde vakumlama ihtiyacı artık gaz molekülleri ile demet arasındaki etkileşimi önlemekten ziyade; partiküllerin veya yüzey tarafından emilen gazların neden olabileceği, niyobyum yüzeylerin kirlenmesini engellemek ve süper iletken özelliklerini sürekli kılmaktır. Bu nedenle ihtiyaç duyulan 10^{-11} Torr vakuma ancak etkili bir vakumlama ve başarılı bir gaz atımı (outgassing) işlemi ile erişilebilir. Ayrıca süper iletkenlik özelliğinin korunması için ihtiyaç duyulan helyum soğutma sistemlerinde de 10^{-6} Torr'luk vakum sağlamak için ayrı vanalar bulunmaktadır.

Temiz bir yüksek vakum elde etmede karşılaşılan en büyük zorluklardan birisi de başarılı bir gaz atımı işlemidir. Bu işlem, bir materyal içerisindeki çözünmüş, tuzaklanmış, donmuş ya da emilmiş gazın salınması işlemidir ve süblimleştirme, buharlaştırma ya da yavaş kimyasal reaksiyonlar ile gerçekleştirilir. Ayrıca

materyalin üretim süreci ve bu süreçteki işlemler de gaz atımına ihtiyaç duyulmasını ortadan kaldıracaktır (Wikipedia, 2013).

Salındırıcılara kadar olan hızlandırıcı kısımlarında tolere edilebilecek en yüksek vakum 10^{-8} Torr mertebesindedir ve bu vakum ortamını sağlamak amacıyla 7 IP ve 7 TMP kullanılması planlanmaktadır.

U25 salındırıcısını ve optik kavitesini içinde barındıran ve BL1 olarak isimlendirilen birinci demet hattında 1×10^{-3} Torr vakuma ihtiyaç duyulurken, U90 salındırıcısını ve optik kavitesini içinde barındıran ve BL2 olarak adlandırılan ikinci demet hattı üzerinde 3×10^{-3} Torr vakuma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaçlar nedeniyle BL1 üzerine 7 IP ve 6 TMP ile BL2 üzerine 8 IP ve 6 TMP yerleştirilecektir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

4.2.2. TARLA güç sistemleri

TARLA tesisinin faaliyetlerine devam edebilmesi ve sürekli olarak operatif moda olabilmesi için güç sistemleri önemli ölçüde rol oynamaktadır. Tesisin hem SEL kısmında hem de deney istasyonları ve diğer faaliyet alanlarında ihtiyacı olan elektrik gücünü karşılamak amacıyla 3 ana trafo, 3 dizel jeneratör ve bunlara ek olarak çalışan 8 kesintisiz güç kaynağı edinilmiştir. Ayrıca bir PLC kontrol ünitesi ve pek çok iç hat dağıtım paneli her hangi bir güç sıkıntısı yaşanmaması için tesise gerektiği şekilde yerleştirilmiştir.

Elektrik şebekesinin yanı sıra TARLA tesisinde, sahip olduğu TESLA tipi hızlandırıcı kaviteler, SHB ve FB için 4 RF istasyon bulunacaktır. Bu RF istasyonlarda gelişen teknolojinin ürünlerinden olan katı hal güç üreteçlerini (Solid State Power Amplifier) (SSPA) kullanması planlanmaktadır.

TARLA tesisindeki kullanılacak olan 4 RF kaynağının da 20 kW'lık SSPA olması düşünülmüştür. Bunun nedeni, 1.0 mA'lık akıma sahip demetlere bir metrede 160 V hızlandırma sağlayabilmek için her bir hızlandırıcı modülüne 20 kW'lık RF gücü aktarımı ihtiyacıdır. SSPA'ların ürettiği RF gücünün % 10'unun kayba uğrayacağı, % 20'sinin de faz ve genlik kontrolünde kullanılacağı düşünülürse her bir modülün

ihtiyaç duyduğu 20 kW'lık RF gücü ancak iki adet 16 kW'lık SSPA'lar ile sağlanabilecektir.

Tüm bunlara ek olarak TARLA elektron tabancasında elektronların üretilmesi için bir adet 350 kV düzeltilmiş DC güç kaynağına, filamentin ısıtılması için bir adet 12 V – 2 A DC güç kaynağına, demet akımının ayarlanması için iki eş 100 V DC güç kaynağına ve demetin odaklanmasında kullanılmak için bir adet 150 kV DC güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

4.2.3. TARLA soğutma sistemleri

SEL üretiminde en önemli yardımcı donanımlardan biride soğutma sistemleridir. Bir SEL tesisi düşünüldüğünde farklı bileşenlerde farklı soğutma yöntemleri kullanıldığı görülmektedir. Bunlar su soğutma sistemi, nitrojen soğutma sistemi ve helyum soğutma sistemi olarak gösterilebilir.

TARLA tesisinde bu soğutma yöntemlerinden üçü de kullanılacaktır. Bunlardan helyum soğutma sisteminin esas amacı TESLA kavitelelerini uygun değer çalışma sıcaklıkları olan 1.8 K'de tutabilmektir. Bunun için gaz olarak alınan helyum, kompresörler yardımıyla 1.3 MPa'lık basınç uygulayarak önce 4 K'ye, daha sonra 1.6 kPa'lık basınç uygulanarak 1.8 K'ye düşürülür (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011; Freund ve Antonsen, 1996).

Nitrojen soğutma sistemleri ise hızlandırıcı modülleri soğutmada kullanılacak olan helyumun transfer hatlarının ve modüller içerisindeki helyum kaplarını yalıtım için kullanılır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Tesisin geri kalan tüm kısmında ise su soğutma sistemi kullanılması planlanmaktadır. Bunun için iki kapalı devre soğutma sistemi ve kulesi ile kompresörler, pompalama üniteleri, atık su depolama ünitesi, vanalar, sensörler ve diğer birçok elemandan oluşturulmuş özel bir su soğutma sistemi tasarlanmıştır. Birçok elektriksel ve mekaniksel donanımın soğutulmasında kullanılacak olan su soğutma sisteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, kullanılacak olan suyun iletken olmayan su (Non-Conductive Water, NCW) olması gerektiğidir. Ayrıca, su soğutma

sistemine dâhil edilmiş tüm donanımların NCW'ye karşı dirençli olması da gereklidir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011; Freund ve Antonsen, 1996).

4.2.4. TARLA diyagnostik

Demet diyagnostik veya tanılama, demetin özelliklerini demet hatları boyunca izleyen ve demetin önceden belirlenmiş parametrelere bağlı olarak herhangi bir uygulama alanında kullanılmasını sağlayacak olan özelliklerini korumaya yönelik donanım ve kontrol sistemlerinin bütünüdür. Bu sistemler sayesinde laboratuvarların performans ve kararlılığı hızlı ve güvenli bir şekilde kontrol edilirken, operatörlerin ve teknisyenlerin iş yükleri azalmaktadır. Hızlandırıcı laboratuvarlarında yapısal olarak iki farklı tanılama sistemi vardır. Bunlardan ilki elektron demet tanılama sistemi ve diğeri ise foton demet tanılama sistemidir (Koziol, 1989).

Elektron demet tanılama sistemi ile elektron demetine zarar verilmeden ölçümlendirme ve hızlandırıcı için doğru demet ayarlarının yapılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda elektron demetine ait; elektronların üretildiği elektron tabancasından çıkıp durdurulduğu durdurucu (dump) kısmına kadar; pozisyon tespiti, görüntülenmesi, akım ölçümü, demet uzunluğunun ölçümü, demet kaybı ölçümü, demet yönlendirilmesi, odaklanması ve sıkıştırılması işlemlerinin tümü gerçekleştirilir (Koziol, 1989).

Bu tanılama işlemleri için farklı araçlar kullanılmaktadır. Bu cihazlar ve TARLA tesisinde kullanılanları bu bölümde açıklanacaktır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Bunlardan ilki demet pozisyonunun ölçülmesi için kullanılan demet konumlandırma ekranı (Beam Position Monitor, BPM)'dir. Buton ve Streepline tipi BPM'lerden TARLA tesisinde uzunlukları 5 – 30 cm arasında değişen Streepline tip BPM'lerden yaklaşık 16 adet kullanılacaktır. Bu tip BPM'in kullanılmasının nedeni ise buton tipi BPM'lere kıyasla daha yüksek sinyal gücüne ve kalitesine sahip olmalarıdır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Demet profili ölçümleri ise sintilatör ekranlar ve optik geçiş radyasyon cihazı olan OTR (Optical Transition Radiation) ile sağlanacaktır. TARLA tesisinin geneli

düşünüldüğünde toplam 4 sintilatör ekran ve 16 OTR kullanılacaktır. Sintilatör ekranların daha az kullanılmasının nedeni sahip oldukları sınırlayıcı özellikleridir. Bunlar, emilimin kalıcı olması ve ekranın hemen yenilenerek anlık tepki verememesi ile tepki eğrisinin doğrusallığıdır. Bu nedenle OTR'lar demeti görüntülemeye daha iyi bir sonuç çıkarmaktadırlar. Fakat bu cihazların da dezavantajı düşük enerji bölgesinde düşük verimlilikte kalmalarıdır.

TARLA tesisinde demet akımını ölçmede Faraday kabı ve akım transformatörleri kullanılacaktır. Demet akımını ölçmede Faraday kabı en kolay yöntemdir. Ancak bu ölçüm yöntemi demeti yok etmektedir ve bu nedenle sadece hızlandırıcının sonuna yerleştirilerek kullanılmıştır. İletken malzemedan yapılan bir bölgeye elektron demetinin çarpması sonucu akım doğrudan bir ampermetre ile ölçülebilmektedir. Faraday kabı demeti yok ettiği için demet hattı boyunca hızlı akım transformatörleri (Fast Current Transformator, FCT) ve bütünleşmiş akım transformatörleri (Integrated Current Transformator, ICT) kullanılması planlanmaktadır. Bu birleşim sayesinde hem akım ölçülebilmekte hem de demet profili anlaşılabilir. TARLA ICT-FCT birleşiminden elektron tabancası çıkışında olmak üzere bir tane ve ICT'den ise 4 tane kullanılacaktır.

Demet enerjisi ve enerji yayını ise iki farklı yöntemle ölçülebilmektedir ve bu yöntemlerin ikisi de TARLA tesisinde kullanılacaktır. Bunlardan ilki bir bükücü mıknatis yardımıyla demetin bükülmesi ve bu sayede momentumunun tayinini sağlayan spektrometredir. Diğer bir yöntem ise benzer şekilde bir bükücü mıknatis ile demetin bükülmesi ve sonrasında bir OTR ekrana düşürülerek incelenmesidir. Yüksek enerjili parçacıkların düşük enerjili parçacıklara göre daha çok bükülecekleri bilgisi ile enerji yayını hesaplaması yapılabilmektedir. Elektron demet enerjisinin ölçülmesi için TARLA tesisinde ilk hızlandırıcı modülünden sonra bir spektrometre, ikinci hızlandırıcı modülünden sonra ise bir bükücü mıknatis ve OTR sistemi yerleştirilecektir.

MPI olarak kısaltılan Martin Puplet Interferometresi, paketçik uzunluğu ölçümünde kullanılmaktadır. MPI temel olarak Michelson Interferometresinin geliştirilmiş bir çeşididir. Bu cihazda, koherent geçiş radyasyonu (Coherent Transition Radiation, CTR) kuartz malzemedan üretilmiş olan bir pencereden geçerek parabolik bir

aynadan yansıtılır. Bunun sonucunda CTR, bir kablo ızgara polarizörü tarafından dikey olarak polarize edilir ve demet ayırıcı üzerinde bir gelen ışın oluşturur. Demet ayırıcıdan yansıyan demet sabit olan çatı aynasına giderken, ilerleyen demet ise hareketli çatı aynasına gider. Yansıyan bu iki demetin girişimi ve ikincil bir demet ayırıcı yardımı ile Golay hücreli kızıl ötesi detektörler sayesinde polarizasyon ve paketçik uzunluğu ölçülebilmektedir.

Demet tanılama araçlarından bir diğeri ise BLM (Beam Loss Monitor) olarak bilinen demet kayıp ekranıdır. Bu cihaz temelinde yüklü parçacıklar ya da gama ışınları ile içerisindeki gazın etkileşmesini sonucu oluşan iyonizasyonu inceleyen bir detektördür. Tepki zamanı oldukça kısa olan bu cihazlar sayesinde demetteki kayıplar çok kısa sürelerde tespit edilebilmekte ve bunun neticesinde gerekli işlemlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Foton demet tanılması sayesinde ise lazerde elde edilen foton demetinin ayarlanabilmesi, kavranıp karakterize edilebilmesi ve spektral dağılımının gözlemlenebilmesi, şiddeti ve dalga boyunun tayini, istatistiksel özelliklerinin incelenmesi, konumunun tespiti, atma aralığının belirlenmesi ve koherentliği gibi ihtiyaç duyulan temel parametreleri hakkında bilgi alınması amaçlanmıştır (Koziol, 1989).

TARLA tesisinde salındırıcılardan sonra üretilen lazer ışınımının deney odalarına taşınmasına kadar geçen süreçte karakteristik özellikleri hakkında bilgi edinilmesi amacıyla çeşitli tanılama cihazları kullanılacaktır. Bunlar; aynalar, lensler ve yansıtıcılardan oluşturulmuş bir foton demeti tanılama masası ile otokorelatör, spektrometre, detektörler ve polarizasyon değıştircilerdir.

4.2.5. TARLA kontrol sistemi

Kontrol sistemleri, tüm tesisin sürekli ve verimli olarak çalışması için son derece önemlidir. SEL elde etmek amacıyla elektronların üretimini sağlayan elektron tabancasından itibaren, oluşan ışınımın deney odalarına aktarımına kadar sürekli çalışacak olan kontrol sistemi; operatörlere her bir cihaz için özel olarak bilgi

aktarmakla kalmayıp tüm tesisin genel durumunun da anlık olarak izlenmesine olanak sağlayacaktır.

TARLA tesisinin sahip olacağı kontrol sistemi, tüm dünyadaki benzer araştırma merkezleri ile eş düzeyde olacaktır. Bu amaçla EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) olarak isimlendirilen deneysel fizik ve endüstriyel kontrol sistemi yazılımı kullanılacaktır. EPICS; DESY, FNAL, JLAB, KEK, INFN, LANL ve SLAC gibi yetkinliğini kanıtlamış araştırma merkezlerinde de kullanılan kontrol yazılımıdır ve standart bir paket yazılım olmayıp, ihtiyaçlara göre değiştirilebilir geliştirilebilen bir yazılımdır. Bu sayede TARLA tesisinin tasarımına ve ihtiyaçlarına göre yeniden düzenlenerek geliştirilmiş özgün bir kontrol sistemi yazılımı elde edilecektir (APS-ANL, 2013).

Bu kontrol yazılımının işletimi bir kontrol odası aracılığı ile yapılacaktır. Kontrol odası, tüm tesisin aktif-pasif çalışan tüm birimlerinin ve elemanlarının tek bir merkezden komuta edilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanacaktır. Bu birimler ve elemanlar arasındaki iletişim; kapalı devre fiber optik hattı kurulması ve bu hattın bilgisayarlar ve sunucu sistemleri ile çalıştırılması ile sağlanacaktır.

4.3. TARLA SEL Parametreleri

Bilimsel araştırmaların yanı sıra sanayi ve savunma gibi alanlarda ve uygulamalarda kullanılmakta olan Serbest Elektron Lazerleri, kullanım alanlarının ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik olarak farklı karakteristik özelliklerde ışınım üretebilecek şekilde inşa edilirler. Bu doğrultuda, belirleyici bazı özelliklerinin farklılık göstermesi ve buna paralel olarak belirleyici parametrelere sahip olmaları gerekir.

Bu parametreleri, oluşturulması planlanan ışınımın karakteristik özelliklerini de belirleyen; dalga boyu, enerji, pik paketçik akımı ve ortalama akım, normalize yayılım, akı, parlaklık ve aydınlık, ayarlanabilirlik, monokromatiklik (tek renklilik), uzaysal ve zamansal koherentlik (eş fazlılık) ve kutuplanabilirlik olarak gösterebiliriz.

Çalışmanın bu kısmında belirtilen bu parametreler ile ilgili tanımlar yapılarak, Türk Hızlandırıcı Merkezi serbest elektron lazerinin sahip olacağı bu parametre değerleri verilmiştir.

4.3.1. TARLA SEL dalga boyu

Serbest elektron lazerleri inşa edilirken dikkate alınan unsurlardan bir tanesi, üretilecek olan ışınımın sahip olacağı dalga boyu aralığı olmaktadır. Bunun nedeni, oldukça maliyetli olan inşa süreci sonunda kurulacak SEL tesisinin, belirli bir dalga boyunda hizmet verirken sağlayacağı faydanın, tüm dalga boylarında ya da daha geniş bir dalga boyu aralığında ışınım üreten bir SEL'den daha fazla olacaktır.

Bir düzlemsel salındırıcıdan elde edilen serbest elektron lazeri ışınımı için, oluşturulacak olan foton demetinin dalga boyu şu eşitlik ile hesaplanır (Wille, 1996).

$$\lambda_{\text{lazer}} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right) \quad (4.10)$$

Burada λ_u ; düzlemsel salındırıcının periyot uzunluğu, γ ; elektron demetinin Lorentz faktörü ve θ ise gözlemci açısı ile elektronun geliş açısı arasındaki fark açıdır ve Şekil 3.6'de gösterilmiştir. Bu dalga boyunu pratik birimler cinsinden belirtmek istersek γ 'yı yerine yazarak ($\gamma = E/mc^2$) şu eşitlik elde edilir (Wille, 1996).

$$\lambda_{\text{sel}}(\text{\AA}) = 13,056 \frac{\lambda_u(\text{cm})}{E^2(\text{GeV})} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (4.11)$$

Denklem (4.11)'de dikkat edilmesi gereken şey ise, dalga boyunun biriminin angström olduğudur. Çizelge 4.3'de farklı spektral bölgelerde elde edilen serbest elektron lazeri dalga boyları ve bu bölgelerde ışınım elde etmek için kullanılan elektronların enerjileri gösterilmiştir (Gezgin,2009).

Çizelge 4.3. Farklı spektral bölgeler için SEL dalga boyu ve enerji aralıkları

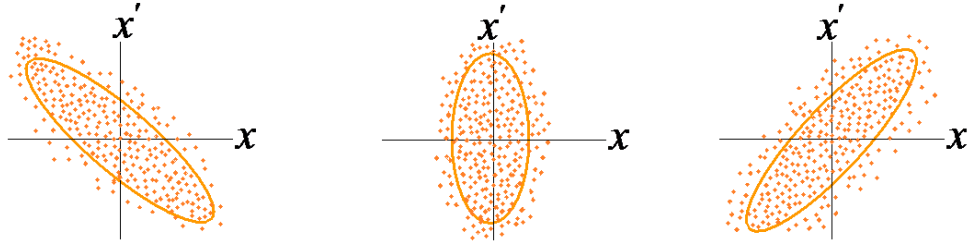
Uzak Kıızıl Ötesi Bölge	1000 - 10 μm	5 – 10 MeV
Yakın Kıızıl Ötesi, Görünür ve Ultraviyole Bölge	10 μm – 200 nm	10 – 50 MeV
Vakum Ultraviyole ve İleri Ultraviyole Bölge	200 – 100 nm	0.5 – 1 GeV
X Işını Bölgesi	100 nm – 1 nm	10 – 20 GeV

TARLA tesisinde ise farklı bilim alanlarındaki bilim insanlarına hizmet etmesi amacıyla iki farklı salındırıcı bölgesi sayesinde farklı iki aralıkta SEL ışınımı üretilmesi mümkün kılınacaktır. Bu salındırıcılardan ilki olan U90 ile 18 – 250 μm dalga boyu aralıkları taranabilecek iken ikinci salındırıcı olan U25 sayesinde elde edilebilecek olan ışınım ile 3 – 19 μm dalga boyu aralığı taranabilecektir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Bu büyüklükler hesaplanırken Denk. (4.11) kullanılmıştır. Maksimum dalga boyu değeri hesaplanırken maksimum salındırıcı periyodu ve maksimum K değerleri ile minimum elektron demet enerjisi kullanılmış iken minimum dalga boyu değeri hesaplanırken minimum salındırıcı periyodu ve minimum K değerleri ile maksimum elektron demet enerjisi değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla maksimum dalga boyu 9 cm salındırıcı periyodu ile 2.77398 K parametresi ve 15 MeV'lik elektron demetleri ile 253.12 μm olarak hesaplanmışken; minimum dalga boyu 2.5 cm salındırıcı periyodu ile 0.81725 K parametresi ve 38.5 MeV'lik electron demetleri kullanılarak 2.94 μm olarak hesaplanmıştır.

4.3.2. TARLA elektron demeti normalize yayılım (emittance)

Elektron demetlerinin kalitesini belirlemek için kontrol edilen iki özellik mevcuttur. Bunlardan ilki demetlerinin enine olan boyutlarının ne kadar küçük olduğu ve değişmediği, diğeri ise elektronların eşit bir şekilde paketçik içerisine dağılmaları sayesinde homojen bir yapı oluşturmalarıdır. Elektronların paketçik içerisindeki konumları ve yörüngelerinin eğimi, zaman içerisinde elektron yörüngesini idealinden saptıracak şekilde biçimlenir (Nguyen vd., 2009). Şekil 4.12'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 4.12. Elektronların paketçik içindeki hareketi (Nguyen vd., 2009)

Bu şekilde gösterildiği gibi; elektron demetleri, parçacıkların $x' - x$, $y' - y$ ve aynı zamanda $\gamma - ct$ faz uzayında istatistiksel dağılımları gibi davranırlar. Burada, parçacıkların etrafında, bu parçacıkların % 50 sini kapsayacak şekilde bir elips çizebiliriz. Bu elipsin alanı, faz uzayında, rms (root mean square) yani etkin elektron yayılımının bir ölçüsüdür. Etkin yayılım ise bu elips alanının π ile bölünmesiyle elde edilir.

$$\epsilon_{\text{rms}} = \frac{A}{\pi} \quad (4.12)$$

Yayılımın boyutu, tek ekseninde (burada x eksenini) düşünüldüğünde x' boyutsuz olduğu için mikron gibi bir uzunluktur. Birimi ise mm-mrad cinsindedir.

Sadece bir eksenindeki yayılım $\langle \rangle$ ile gösterilen; x^2 , x'^2 ve $x' - x$ ilişkisinin ortalamaları ile tanımlanır. Diğer boyutları düşündüğümüzde x ifadesi değişecektir. Bu durum da Denk. (4.13)'de gösterilen eşitlik ile ifade edilebilir.

$$\epsilon_{\text{rms},x} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2} \quad (4.13)$$

Burada;

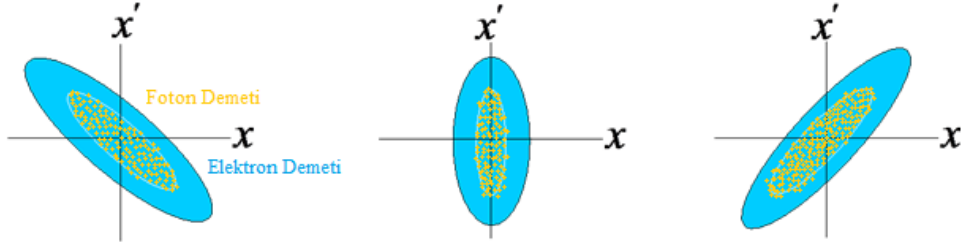
$$x^2 \text{, nin ortalaması ; } \langle x^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - x_0)^2$$

$$x'^2 \text{, nin ortalaması ; } \langle x'^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x'_j)^2 \text{ ve}$$

$$x' - x \text{ ilişkisi ; } \langle xx' \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - x_0)x'_j$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Elektron demeti ile foton demeti arasında pozitif enerji geçişini sağlamanın bir koşulu da; elektronların sahip oldukları faz uzayı yayılım alanlarının, foton demetinin sahip olduğu faz uzayı yayılım alanından daha düşük olması gerekliliğidir (Nguyen vd., 2009). Şekil 4.13’de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Elektron demeti ve foton demeti yayılım alanları (Nguyen vd., 2009)

Elektron demetinin hızlandırılması, normalize olmamış yayılımını azaltacaktır. Bu duruma adiabatik sönmüleme denir. Normalize yayınımları ise geniş yani kötü olan elektron demetleri ise yüksek enerjilere hızlandırılmalıdırlar. Sabit bir dalga boyu ve demet enerjisinde; serbest elektron lazerleri için gereken normalize yayılım değeri $\varepsilon \leq \lambda/4\pi$ şartını sağlamalıdır (Nguyen vd., 2009).

TARLA tesisinde üretilecek olan elektron demetlerinin sahip olacakları normalize enine yayılımın 12 mm-mrad mertebesinden daha küçük olması beklenmektedir (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

4.3.3. TALA SEL enerjisi ve gücü

Serbest elektron lazerlerinde, salıncı içerisinde hareket etmekte olan elektronun sahip olduğu enerji Denk. (4.14) ile hesaplanır (Dattoli vd., 1993).

$$E = \gamma m_e c^2 \quad (4.14)$$

Üretilecek olan lazer ışınımının dalga boyunun, dolayısıyla enerjisinin ayarlanması; elektron enerjisinin değişmesine ya da salıncı parametresi olan ve salıncıdaki mıknatısların kutupları arasındaki mesafenin veya manyetik alanın değişmesi ile değişebilecek olan K parametresinin değişmesine bağlıdır (Wille, 1996).

Denklem (4.11)'de belirtilen eşitlikten de anlaşılacağı gibi, daha kısa dalga boyuna sahip SEL ışınması elde edilebilmesi için elektron demetinin daha yüksek enerjilere sahip olması gerekmektedir. Salındırıcı parametresi K, manyetik alan B ile orantılıdır ve tipik olarak 1 ile 3 arasında değişmektedir (Prazeres vd., 1990).

Salındırıcı parametresi K, $K = eB\lambda_0/2\pi mc$ şeklinde ifade edilebileceği gibi pratik birimler cinsinde $K = 0,9337 B_u[T]\lambda_u[cm]$ şeklinde de ifade edilebilir (Wille, 1996).

Elektromanyetik spektrumdaki dalga boyuna sahip olacak şekilde ışınma üretmek için gerekli olan elektron enerjileri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Bu enerji aralığında belirtilen elektronların kullanılması ile elde edilecek serbest elektron demetinin enerjisi ise Denk. (4.15)'de gösterilen şu bağıntıyla hesaplanır (Dattoli ve Renieri, 1997).

$$E_{sel}(eV) = 950 \frac{E^2(GeV)}{\lambda_u(cm) \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} \quad (4.15)$$

Denklem 4.15'de gösterilen eşitlik kullanılarak maksimum ışınma enerjisi minimum K değeri 0.81725 ve minimum salındırıcı periyodu 2.5 cm değerleri ile 0.4132 eV olarak hesaplanmışken, minimum ışınma enerjisi değeri, maksimum K değeri 2.77398 ve maksimum salındırıcı periyodu 9 cm değerleri ile 0.0049 eV olarak hesaplanmıştır.

Elektron demetinin gücü; L_u , metre cinsinden salındırıcı uzunluğu, I_e , amper cinsinden elektron demetinin akımı, E_e , GeV cinsinden elektron demet enerjisi ve B_u , Tesla cinsinden salındırıcı mıknatısların pik manyetik alanı olmak üzere Denk. (4.16)'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır (Dattoli ve Renieri, 1997).

$$P [kW] = 0,632 L_u I_e (E_e)^2 (B_u)^2 \quad (4.16)$$

Bu durumda, tanımlanan değişkenler yukarıda belirttikleri mertebelerden seçildiklerinde, serbest elektron lazerinin çıkış gücü; kW cinsinden elde edilir. Gücün pik değeri için üst limit sinkrotron ışınımında 10^3 W civarında iken bu değer serbest elektron lazerleri için $10^9 - 10^{10}$ W mertebesine ulaşabilmektedir (Dattoli ve Renieri, 1997).

TARLA tesisinde üretilecek olan elektron demetinin enerjisi, hedeflenen dalga boyu aralığına ulaşabilmek amacıyla 15 – 38.5 MeV aralığında olacaktır. Bunun neticesinde U90 salındırıcı ile elde edilecek olan ışınımın maksimum atma enerjisi yaklaşık olarak 8 μ J ve U25 salındırıcı ile elde edilecek olan ışınımın maksimum atma enerjisi ise, yaklaşık olarak 10 μ J olacaktır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

U90 salındırıcı ile elde edilecek olan ışınımın maksimum paketçik gücü yaklaşık olarak 2.5 MW iken ortalama gücü ise 0.1 – 30 W aralığında, U25 salındırıcısı ile elde edilecek ışınım maksimum paketçik gücü ise 5 MW iken ortalama gücü 0.1 – 40 W aralığında olacaktır (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

4.3.4. TARLA pik paketçik akımı, ortalama akım ve paketçik zaman yapısı

Hızlandırıcı gerilimin bir dalga boyu kadar veya bu dalga boyu değerinin katlarında bir değere sahip olan mikro paketçikler elektron demeti için en küçük birimlerdirler. Hızlandırılmış olan elektronların, bu mikro paketçik yapıya sahip olacak şekilde oluşturdukları akımın pik değeri; q , paketçik yükü, c , ışık hızı ve σ_z , paketçik uzunluğu olmak üzere şu şekilde tanımlanır.

$$I = \frac{qc}{(2,35 \sigma_z)} \quad (4.17)$$

Denklem 4.17’de gösterilen eşitlik ile 0.5 ps ve 0.8 ps uzunluklu demetler düşünüldüğünde 77 pC yüklü bu yapılar için pik paketçik akımı hesaplamaları yapılmıştır. Paketçik uzunluğu hesabı paketçiklerin ışık hızı ile hareket ettikleri varsayılarak basit bir hesap ile 0.5 ps için 2.4×10^{-3} m ve 8 ps için 1.5×10^{-4} m olarak hesaplanmış ve bu değerler ile pik paketçik akımı 0.5 ps’lik yapılar için 65.48 A ve 8 ps’lik yapılar için 4.093 A olarak hesaplanmıştır.

Demetteki elektronlar; ortak bir referans noktası etrafında faz salınımları yaparlar ve bunun neticesinde boyuna kararlı bir dağılım oluştururlar. Buna da paketçik uzunluğu denir. Elektron paketçiklerinin, hızlandırıcı sonunda oluşturdukları ortalama demet akımına ise ortalama akım denir. $\langle I \rangle$ ile sembolize edilen ortalama akım hesaplanırken; q , paketçik yükü, n_μ , bir atma içindeki mikro paketçik sayısı ve T_r , ise ardışık iki mikro atma arasındaki zaman farkı olarak kabul edilir ve ortalama demet akımı Denk. (4.18)'de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$\langle I \rangle = \frac{n_\mu q}{T_r} \quad (4.18)$$

Ardışık iki mikro atma arasındaki zaman farkı, T_r , bir saniyede doğrusal hızlandırıcı tarafından üretilen atma sayısı olan f_{inak} ile Denk. (4.19)'da gösterildiği gibi ilişkilidir (Nguyen vd., 2009).

$$T_r = \frac{1}{f_{\text{inak}}} \quad (4.19)$$

Paketçik yükünün 77 pC olması ve TARLA tesisindeki paketçiklerin 13 MHz tekrarlama frekansına sahip olması sayesinde 1.001 mA değerinde ortalama akıma sahip demetler elde edilebilmektedir.

4.3.5. TARLA SEL akı, parlaklık ve aydınlık değerleri

Üretilen lazer ışınımının kalitesini belirlemede; akı, aydınlık (brilliance) ve parlaklık (brightness) en önemli niceliklerdendirler. Birim zamanda, yani saniye başına, belirli bir enerji aralığında yayılan foton sayısı, akı olarak isimlendirilir. Bu enerji aralığını; kullanılabilir foton enerjisinin % 0.1 bant genişliği oluşturur. Belirtilen bu enerji aralığındaki foton akısı (F) genellikle 1 A'lık demet akımına normalizedir ve Denk. (4.20)'de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$F = \frac{\text{foton}}{\text{s } \%0,1 \text{ bantgenişliği}} \quad (4.20)$$

Serbest elektron lazerinin akısı, aynı zamanda; ω_1 ilk harmoniğin frekansı, N_u , salındırııcıdaki mıknatısların kutup sayısı, J_n , n. dereceden silindirik Bessel fonksiyonu ve n salınım harmoniklerinin mertebesi olmak üzere Denk. (4.21)'de gösterilen şu hesaplama ile elde edilir.

$$I_{sel} = 1,74 \times 10^{14} N_u^2 (E_e [\text{GeV}])^2 I[A] F_n [K] f(n\nu_n)$$

$$F_n [K] = \xi n^2 \left[J_{\left(\frac{n-1}{2}\right)}(n\xi) - J_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}(n\xi) \right]^2 \quad \xi = \frac{1}{2} \frac{K^2}{1+K^2}$$

$$f(\nu) = \left(\frac{\sin \nu/2}{\nu/2} \right)^2, \quad \nu_n = 2\pi N_u \frac{n\omega_1 - \omega}{n\omega_1}, \quad n = 1, 3, 5 \dots$$

$$\omega_1 = E_{fel}/\hbar$$

Işınım kaynağı, eğer yapılan deneyde yüksek konum çözünürlüğü gerekiyorsa noktasal kaynak olarak kabul edilir. Bu durumda, ışınımın enine genişliği ve demetin açılmal sapması küçük olmalıdır. Bu gereklilikler göz önünde bulundurularak; demetin kalitesi parlaklık (brilliance) ve aydınlık (brightness) terimleri ile açıklanabilir.

Salındırııcı içerisinde yer alan demetin kesit alanı; $\sigma = \sqrt{\epsilon\beta}$ eşitliği ile elde edilir. Burada β terimi, demetin odaklandığı noktayı açıklayan pozisyon bağımlılık ifadesidir. β , mıknatıs yapısı ve kuadropollerin kuvvetine göre geniş bir seçenek aralığında değişmektedir.

Serbest elektron lazerinin aydınlık ifadesi; demetin açılmal sapması olarak tanımlanan $\sigma'_{x,z} = \sqrt{\epsilon_{x,z}\beta_{x,z}}$ eşitliğine bağlı olarak Denk. (4.22)'de gösterildiği şekilde elde edilir.

$$S = \frac{F}{2\pi\sigma'_x\sigma'_y} = \frac{F}{2\pi} \frac{\sqrt{\beta_x\beta_z}}{\sqrt{\epsilon_x\epsilon_z}} = \frac{\text{foton}}{s \%0,1 \text{ bantgenişliği mrad}^2}$$

Parlaklık ise; akı değerinin kaynak ile ilgili açılmal alana bölünmesiyle elde edilir ve aynı zamanda parlaklık, demetin kesit alanı olan (enine demet boyutu) $\sigma_{x,z} = \sqrt{\epsilon_{x,z}\beta_{x,z}}$ ifadesine bağlıdır. Dolayısıyla parlaklık hesabı için Denk. (4.23)'de gösterilen ifade kullanılır.

$$B = \frac{F}{4\pi^2\sigma_x\sigma_y\sigma'_x\sigma'_y} = \frac{F}{4\pi^2\epsilon_x\epsilon_z} \quad (4.23)$$

Bu eşitliklerde belirtilen, $\sigma_x\sigma_y$ ifadesi etkin kaynak alanını belirtirken; $\sigma'_x\sigma'_y$ ifadesi faz uzayı alanını tanımlamaktadır. Pratik birimler cinsinden, σ_z paketçik uzunluğu olmak üzere, doygun parlaklık Denk. (4.24)'de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$B_s \cong 3,977 \cdot 10^{42} \left(\frac{E[\text{GeV}]}{N} \right)^4 \frac{\sigma_z[\text{mm}]}{(\lambda_u[\text{cm}] \cdot [kfb(k)])^2} \quad (4.24)$$

Bu eşitlik, kavite içi parlaklık için bir referans değer olarak kullanılabilir. Genel anlamda, doygun parlaklık değeri, ışınımdaki doymuş yoğunluğu veren Denk. (4.25) yardımı ile Denk. (4.26)'da gösterildiği şekilde tanımlanabilir (Nguyen vd., 2009).

$$I_s \left[\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right] \cong 10^{22} \frac{E^4[\text{GeV}]}{N^4} \frac{1}{(\lambda_u[\text{cm}] \cdot [kfb(k)])^2} \quad (4.25)$$

$$B_L \cong 6.4 \cdot 10^{37} \frac{I[\text{A}]}{N} \frac{E[\text{GeV}]^3}{\lambda_u[\text{cm}] \cdot L_c[\text{cm}]} \frac{\sigma_z[\text{mm}]}{1 + K^2/2} \quad (4.26)$$

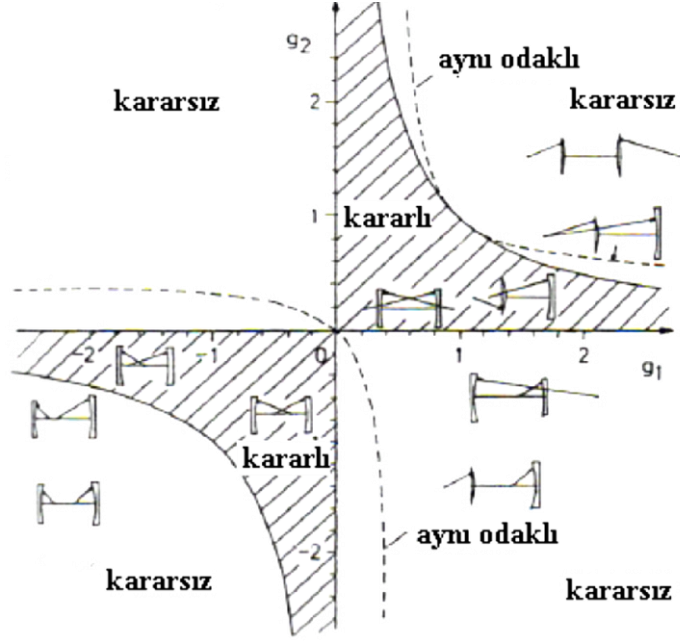
4.3.6. TARLA SEL koherentlik

Serbest elektron lazerlerinin bir diğer önemli özelliği ise koherent yani eş fazlı ışınım oluşturmalarıdır. SEL'ler genellikle kırınım limitli enine koherentliğe sahiptirler. Çıkış modu genellikle Gaussiyendir. Osilatör SEL'ler, sahip oldukları optik kavite sayesinde, buradaki çoklu geçişler nedeniyle çok iyi enine koherentlik özelliğine sahiptirler. Optik kavitenin fiziksel boyutları, kavite uzunluğu ve kullanılan aynaların yarıçapları optimize edilerek koherentlik şartı sağlanabilmektedir (Wille, 1996).

Optik kavite sistemlerinde kullanılan aynalar için kararlılık parametresi g ile tanımlanmıştır. Her bir ayna için kararlılık parametresi hesabı Denk. (4.27)'de gösterildiği şekilde ayarlanmıştır.

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad \text{ve} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (4.27)$$

Şekil 4.15’de gösterilen kararlı bölgenin tayini için Denk. (4.27)’de hesaplanma yöntemi belirtilen aynalara ait kararlılık parametrelerinin $0 < g_1 g_2 < 1$ şartını sağlıyor olmaları aranır. Bu durumda eksen kararlı durum gösterecektir.



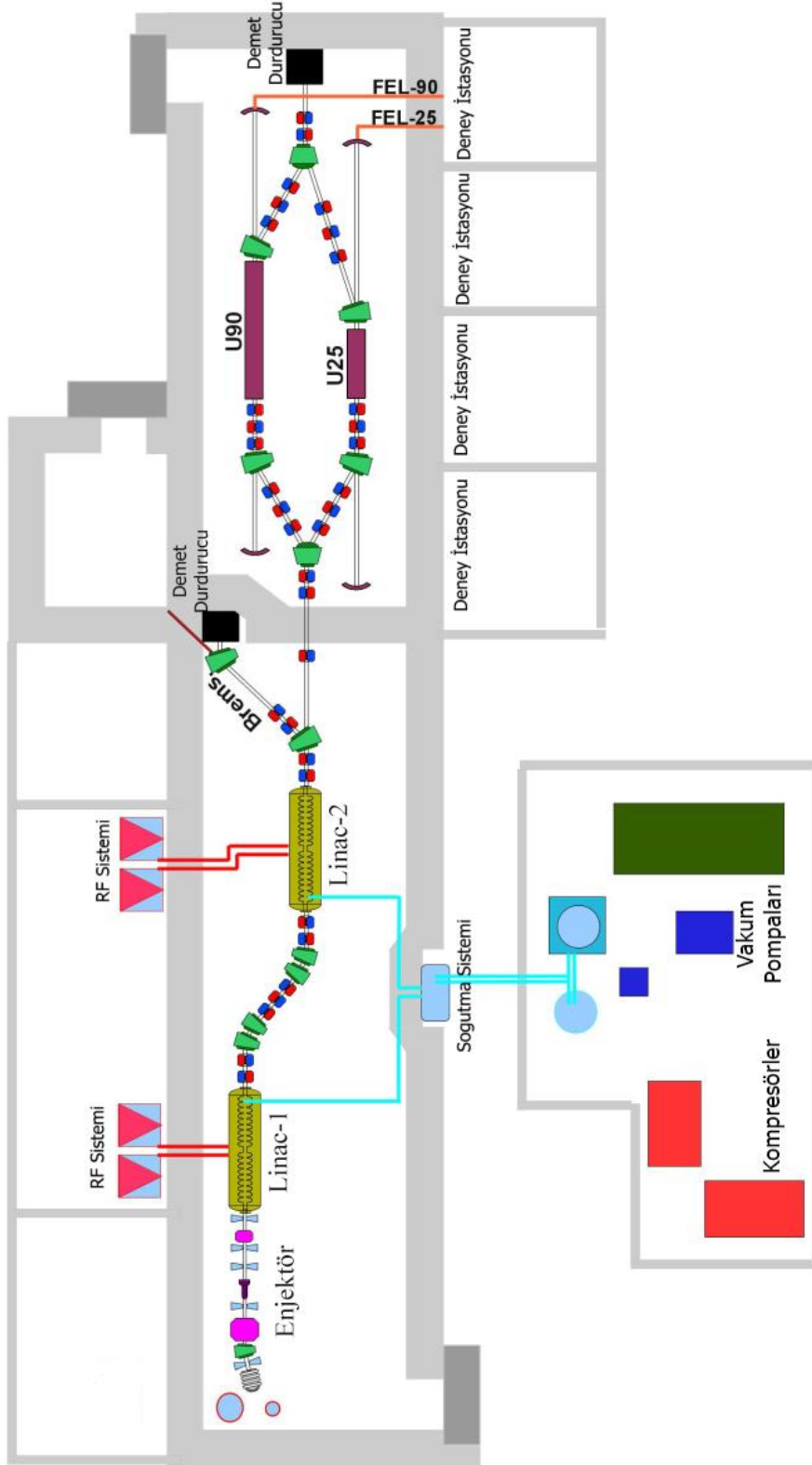
Şekil 4.14. Kararlı ve kararsız durumların şematik gösterimi (Gezgin, 2009)

Kullanılabilecek en küçük salındırıcı mıknatıs aralığı, Gaussian demet noktası ile belirlenir. Salındırıcı aralığı için kıstas; ω gaussian noktasal genişlik olmak üzere $g > \pi\omega$ şeklinde verilir. Bu koşul sağlandığında, elektron demetinin %99’dan daha büyük bir kısmı salındırıcı boyunca iletilebilmektedir. Ayrıca, gaussian demet, kavite içerisinde salındırıcı mıknatıs gap aralığından (g) geçebilecek büyüklükte olmalıyken, her bir kavite aynası üzerindeki demet noktasal boyutu ise aynalardaki kayıpları engellemek amacıyla küçük değerlerde olmalıdır. Bu sebeplerden dolayı, optik kavite uzunluğu iyi ayarlanmalı ve gereksiz yere uzatılmamalıdır (Wille, 1996).

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışma, ülkemizin ilk serbest elektron lazeri olacak olan ve THM projesi kapsamında TARLA tesisinde inşa edilen ışınım kaynağı için gerçekleştirilmiştir. THM projesi, 1997 yılında Ankara Üniversitesinden araştırmacıların DPT desteği ile başlattıkları “Parçacık Hızlandırıcıları: Türkiye’de Neler Yapılmalı” konulu fizibilite projesi ile başlatılmış ve projenin 2000 yılında tamamlanan sonuç raporunda Türk Hızlandırıcı Merkezinin kurulması önerilmiştir (Çiftçi, vd., 2000; Yavaş, 2000; Yavaş, 2001; Yavaş, 2004). İkinci aşama olan Genel Tasarım çalışmaları; 2002 – 2005 yılları arasında yürütülen iki proje ile tamamlanmıştır. Bu projeler “Türk Hızlandırıcı Kompleksi Genel Tasarımı” ve “Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri Üretimi ve Kullanımı için Genel Tasarım” başlıkları ile sırasıyla Gazi ve Ankara Üniversiteleri tarafından koordine edilmişlerdir (Sultansoy, 2005; Yavaş, 2005). 2006 yılından beri yürütülen 3. Aşama çalışmaları Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje (YUUP) formatında sürdürülmekte ve halen projede 14 üniversiteden 168 araştırmacı yer almaktadır. 3. aşama çalışmalarının 2014 yılı sonunda tamamlanması öngörülmektedir (THM, 2013). Kurulumu sürmekte olan TARLA tesisi; THM’nin ilk tesisi olarak planlanmıştır. Proje kapsamında ayrıca THM’de yer alması planlanmış olan GeV enerjili hızlandırıcılara dayalı 4 tesisin Teknik Tasarımları ve projelendirme çalışmaları gerçekleştirilmektedir (THM, 2013). Bu çalışmada TARLA tesisi serbest elektron lazeri için elektron demet hattı tasarımı ve demet parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır.

İlk olarak, ışınım kaynakları hakkında teorik bilgi edinilerek literatür taraması tamamlanmış ve tarihsel gelişim süreçleri incelenmiştir. Ayrıca; serbest elektron lazerlerinin yapıları, çalışma prensipleri ve tipleri incelenmiş, ışınım üretilmesi sürecince gerçekleşen fiziksel olaylar analiz edilmiştir. Bu kısımlarla ilgili sonuçlar çalışmanın ilgili bölümlerinde detaylı olarak sunulmuştur. Son olarak da, TARLA tesisinde inşa edilecek olan serbest elektron lazerinin elektron demet hattı tasarımı gerçekleştirilmiş ve demet parametrelerinin belirlenmiştir.



Şekil 5.1. THM TARLA SEL demet elemanları ve şematik gösterimi (THM Dökümantasyon Sistemi, 2013)

Şekil 5.1’de TARLA tesisinin şematik gösteriminde, elektronların üretilecekleri elektron tabancasından, ışınımın üretilip deney istasyonlarına aktarılacağı rezonatör bölgesi ve sonunda elektron demetlerini durduracak olan demet durdurucu sistemi de içerecek şekilde görülmektedir. Ayrıca, şekil üzerinde RF kaynakları ve hızlandırıcı modüllere üretilen RF’in aktarılacağı yapı ile bu modüllere ait soğutma sistemleri de gösterilmiştir.

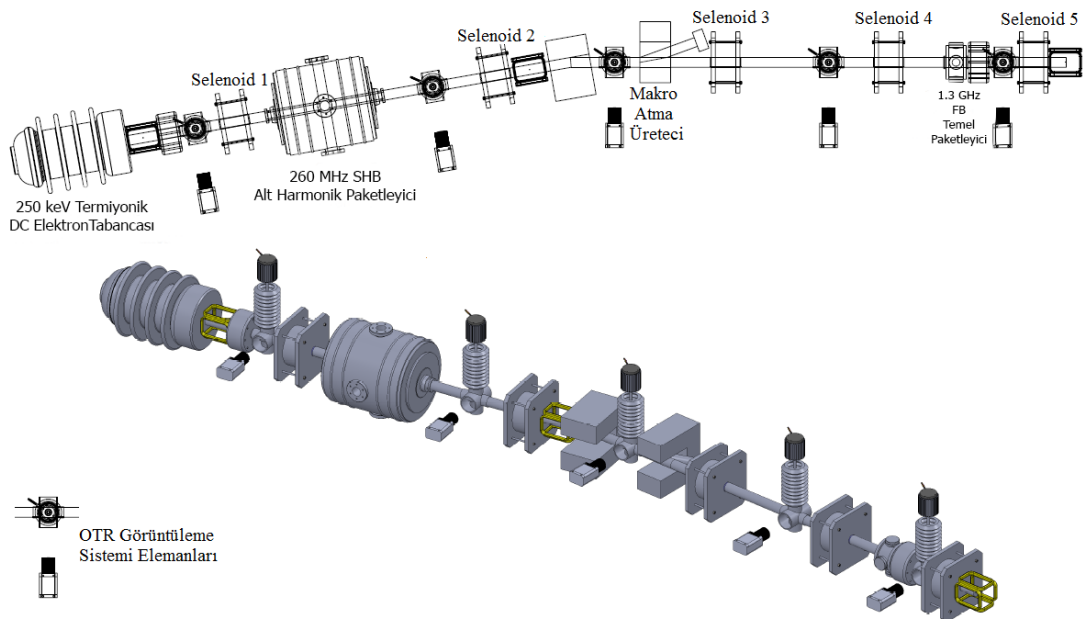
Demet hattının ana yapısını gösteren Şekil 5.1 üzerinde farklı renklerde demet hattı elemanları gösterilmiştir. Bunlar, tüm demet hattı düşünüldüğünde belirli bir yapıya göre sıralanmışlardır. Bu sıralanma elektronların üretilecekleri termiyonik DC elektron tabancası ile başlamaktadır. Bu cihaz sayesinde elektronlar 250 keV’a kadar hızlandırılabilen ve 500 ps uzunluğunda demetler elde edilebilmektedir. Üretilen bu elektron demetlerini şekillendirmek ve belirli bir zaman yapısına uygun halde hareket etmelerini sağlamak amacıyla ise solenoidler ve 260 MHz’lik bir ön paketleyici ile 1.3 GHz’lik bir ana paketleyici kullanılmıştır. İstenilen karakteristik yapıda SEL ışınımı üretilebilmesi amacıyla, bu elektron demetlerinin 38.5 MeV’lik enerjiye sahip olmaları gerekmektedir ve bu ihtiyaç her biri 9 hücreli iki tesla kavitesi içeren iki hızlandırıcı modül ile sağlanmaktadır. Bu modüllerin çalışmaları için gerekli olan 10 kW’lık RF gücü ise toplam dört adet 18 kW’lık SSPA ile sağlanacaktır.

TARLA tesisinde pek çok farklı bilim dalından araştırmacıya hizmet edebilmek amacıyla iki farklı dalga boyu aralığında ışınım üretilmesi planlanmaktadır. Bu nedenle 25 mm periyot uzunluğuna sahip U25 ve 90 mm periyot uzunluğuna sahip U90 salındırııcıları kullanılacağı belirtilmiş ve bu salındırııcıların karakteristik özellikleri detaylarıyla ilgili bölümde sunulmuştur. Bu salındırııcıları içlerinde barındıran optik kavitelere ise kullanılacak ayna eğrilikleri; U25 için 5.86 m ve U90 için 6.32 metre olarak tanımlanmış iken, Rayleigh uzunlukları U25 için 0.75 m ve U90 için 1.8 m dir. Elektron demet hattının sonunda konumlandırılmış olan ve elektron demetlerinin ışınım üretildikten sonra zararsız bir şekilde yok edilmelerini sağlayan sistem olan demet durdurucu sistem ise karbonda imal edilmiş yarıçapı 5 cm ve uzunluğu 20 cm olan silindirik bir yapının ortasında 2.5 cm yarıçapta ve 2.5 cm uzunlukta konik bir boşluğun açılması ile elde edilmiştir.

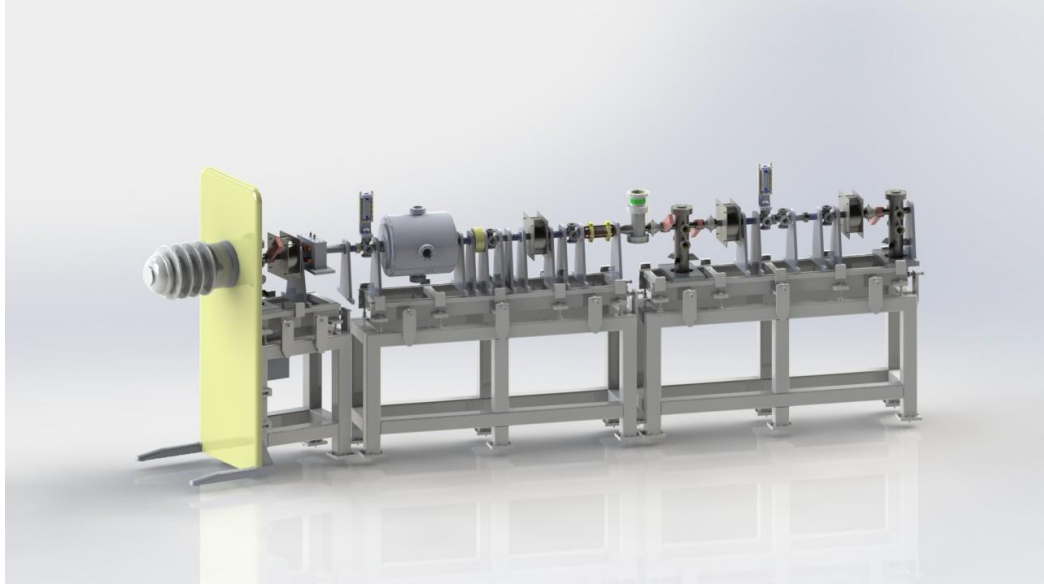
TARLA tesisinin genel elektron demet hattı düşünüldüğünde toplamda 26 adet iyon pompası ve 22 adet turbo moleküler pompa kullanılması öngörülmektedir. Ayrıca tanılama sistemlerinde ışınım üretilmesi sürecine kadar demet hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamak amacıyla toplam 16 adet BPM ve 16 adet OTR ile 4 adet sintilatör ekran kullanılması planlanmaktadır.

Tüm bu özellikler düşünüldüğünde, ülkemizde kurulması planlanan ilk serbest elektron lazerine ev sahipliği yapacak olan TARLA tesisinin, bu alandaki öncü merkezlerden olan HZDR araştırma merkezindeki ELBE ile temel özellikler açısından çok benzer olduğu görülmüştür. Fakat aynı zamanda, THM TARLA SEL tesisi sahip olacağı bazı değerler ile ELBE tesisinden üstün olacağı görülmüştür. TARLA SEL, 1 mA ortalama demet akımı değeri ile ELBE tesisinin 0.85 mA'lık demet akımı değerini geçecektir. Ayrıca ELBE tesesinde maksimum demet enerjisi 20 MeV iken TARLA tesisinde bu değer Linac 2 çıkışında 38.5 MeV'e kadar ulaşabilecek, dolayısıyla TARLA tesisinde daha geniş bir aralıkta ışınım elde üretilmektedir. Ayrıca bu demetler sayede ortalama güç değerleri TARLA SEL tesisinde ELBE tesisindekinden üstün olacaktır (HZDR, 2013)

Şekil 5.2'de TARLA serbest elektron lazerinin enjektör hattının tasarımı gösterilirken, Şekil 5.3'de enjektör hattının genel görünümü görülmektedir.



Şekil 5.2. THM SEL enjektör hattı tasarımı (THM Dökümantasyon Sistemi, 2013)



Şekil 5.3. THM SEL enjektör hattı genel görünümü (THM Dökümantasyon Sistemi, 2013)

Yapılan analitik hesaplama çalışmalarının sonucunda ise, TARLA tesisinde kurulacak olan serbest elektron lazerine ait beklenen demet parametreleri araştırma bulguları bölümünde sunulan eşitliklerle elde edilmiştir. Beklenen elektron demet parametreleri Çizelge 5.1’de ve beklenen ışınım demet parametreleri ise Çizelge 5.2’de sunulmuştur (Özkorucuklu ve Aksoy, 2011).

Çizelge 5.1. TARLA beklenen elektron demet parametreleri

Parametreler	Değerleri
Enerji (MeV)	15 – 38.5
Paketçik Yüğü (pC)	80
Ortalama Demet Akımı (mA)	1.0
Mikro Demet Tekrarlama Oranı (MHz)	13 – 26
Makro Demet Devam Süresi (μ s)	10 – Sürekli Mod
Makro Demet Tekrarlama Oranı (Hz)	1 – Sürekli Mod
Paketçik Uzunluğu (ps)	0.5 – 8
Normalize RMS Enine Yayınım (mm mrad)	< 12
Normalize RMS Boyuna Yayınım (keV.ps)	< 40

Çizelge 5.2. TARLA beklenen ışınım parametreleri

Parametre	U 25 Değeri	U90 Değeri
Dalga Boyu (μm)	3 – 19	18 – 250
Micro Atma Tekrarlama Oranı (MHz)	13	13
Maksimum Tepe Gücü (MW)	~5	~2.5
Ortalama Güç (W)	0.1 – 40	0.1 – 30
Maksimum Atma Enerjisi (μJ)	~10	~8
Atma Uzunluğu (ps)	1 – 10	1 – 10

Bu çalışmalara ek olarak, elektron tabancasından itibaren hızlandırıcı modüllerden ilkinin girişine kadar olan kısmı ihtiva eden ve Şekil 5.2 ile gösterilmiş olan enjektör kısmının, PARMELA isimli benzetim programı ile analizi gerçekleştirilmiştir.

PARMELA benzetim programı, ismini “Phase and Radial Motion in Electron Linear Accelerators” kelimelerinin başharflerinden almaktadır. Bu benzetim programı, Fortran 95 dilinde yazılmıştır ve Windows işletim sistemi tabanlı cihazlarda çalışabilmektedir. 1980’li yıllarda Kenneth R. Crandall tarafından geliştirilmeye başlanan kodun, günümüzde 3. versiyonu kullanılmaktadır. İlk versiyonundan beri PARMELA, Los Alamos Accelerator Code Group (LAACG) tarafından dağıtılmakta ve geliştirilmektedir. İsminden de anlaşılacağı üzere PARMELA genellikle ışıksal elektron kaynakları, iletim sistemleri, yüksek şiddetli elektron ve iyon doğrusal hızlandırıcılarının tasarımında ve benzetiminde kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak PARMELA aynı zamanda tıbbi arındırma (sterilizasyon) ve iyon implimantasyon (iyon ekimi) uygulamalarının tasarımı ve benzetiminde de kullanılır (Young, 2003; Young ve Billen, 2003).

Temel olarak PARMELA ile elde edilmek istenen, kullanıcı tanımlı alanlar içerisinde demet dinamiği benzetimini inceleyebilmektir. PARMELA bu benzetimi zamanı bağımsız değişken olarak tayin edip parçacıkların yörüngelerinin integralini alarak yapar. Kullanıcı tanımlı alanlar olarak ise Superfish, egun gibi diğer benzetim programları ile oluşturulmuş olan RF alanlar ve durgun manyetik alanları kullanır.

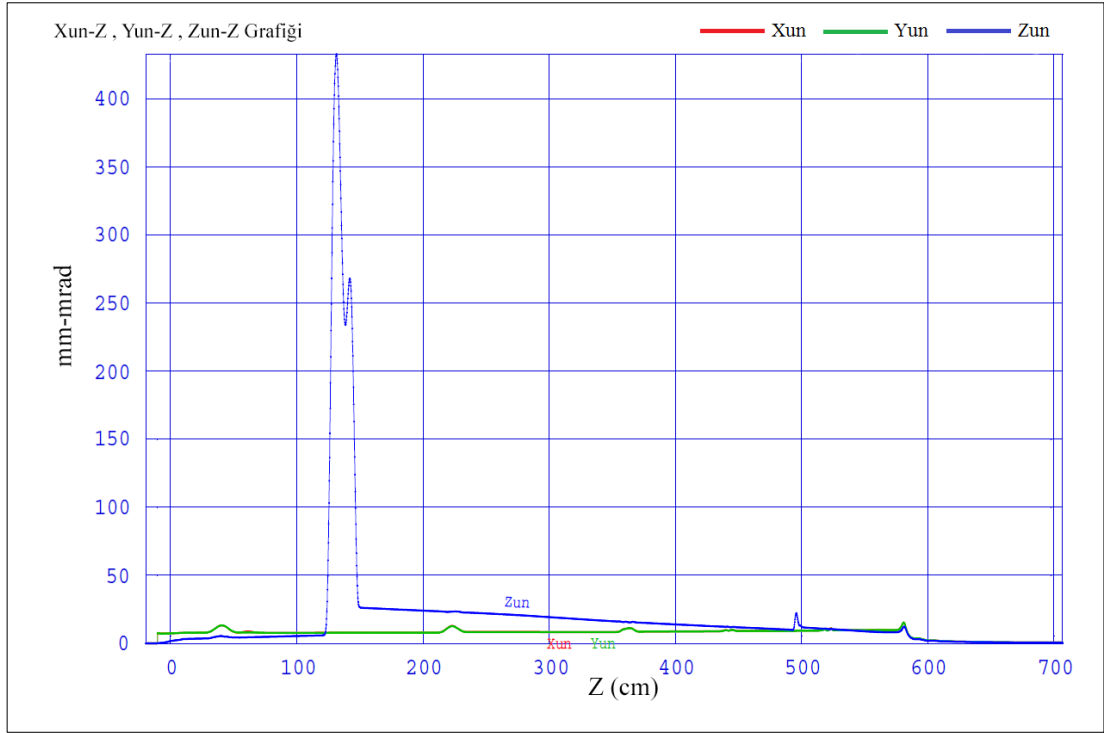
PARMELA, bir demet hattının tasarımında kullanılacak pekçok çeşitli hızlandırma ve odaklama bileşenlerini ön tanımlı olarak içermektedir. Oluşturulmak istenen demet hattının yapısı, bu ön tanımlı bileşenlerin özelliklerinin istenilen yapınıninkine göre programlanması ile kullanıcının üzerinde çalışacağı demet hattı tanımlanabilmektedir. PARMELA programında parçacıkların takip edilmesi için kullanılan koordinat sistemi 6 eksenlidir. Bunlardan üçü; yatay (x), dikey (y) ve boyuna (z) eksenlerdir. Diğer üçü ise boyutsuz momentum koordinatları olan $\beta\gamma_x$, $\beta\gamma_y$, ve $\beta\gamma_z$ dir (Young, 2003; Young ve Billen, 2003).

Bu çalışmanın benzetim aşamalarında kullanılan kod, elektron tabancası ile üretilen parçacıkların; bir demet yapısı halinde demet hattı boyunca iletilmesini ve bu süreçte gerçekleşen değişimlerin incelenmesini sağlamaktadır (Aksoy, 2013).

Bu amaçla kod içerisinde demet hattı yapısı oluşturulurken; demetin karşılaşılabileceği ve demet hattı elemanlarının sahip oldukları özelliklere göre farklılık gösterebilecek olan tüm elektriksel ve manyetik alanlar ile boşluk (sürüklenme) bölgeleri Poisson Superfish benzetim programı ile tanımlanmıştır (Billen ve Young, 2003).

Bu sayede demetin, tanımlı demet hattı içindeki muhtemel hareketi ve karakteristik yapısı hakkında bilgiler elde edilmiştir. Tüm demet hattını kapsayan analiz çalışmalarına ise gerekli demet hattı elemanlarına ait alanların tanımlamaları yapılarak devam edilmektedir (Aksoy, 2013).

Yapılan benzetim çalışmalarının yorumlandığı takip eden şekillerdeki grafiklerde, hareket eksenini kabul edilen z eksenini yatay eksen olarak atanmış iken, dikey ekseninde normalize ve normalize olmayan yayılım, enine rms büyüklüğü ile rms paketçik uzunluğu ve ortalama enerji gibi değerler atanmıştır. Tüm grafiklerde yatay eksen, aynı zamanda demetin ilerleyişini gösterdiği için zaman eksenini olarak da kabul edilebilir.

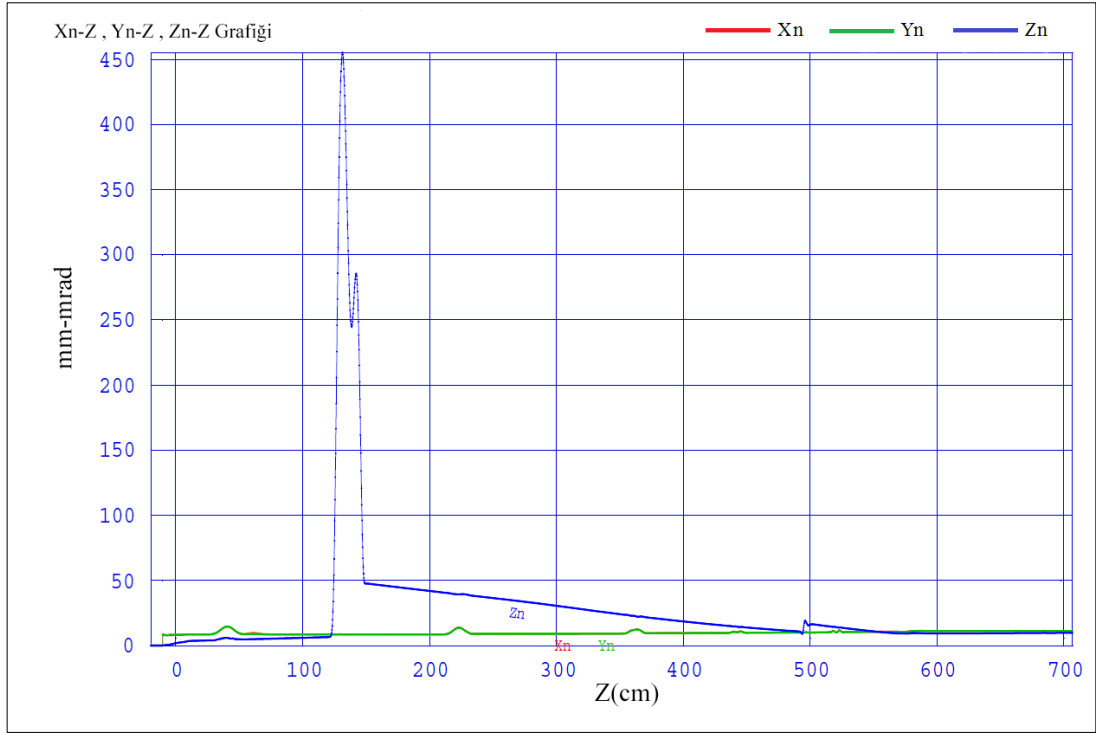


Şekil 5.4. X_{un} -Z, Y_{un} -Z, Z_{un} -Z grafiği

Şekil 5.4 ile gösterilen grafikte X_{un} normalize olmamış $X-X_p$ yayını, Y_{un} normalize olmamış $Y-Y_p$ yayını ve Z_{un} normalize olmamış $Z-Z_p$ yayını temsil etmektedir. Normalize olmamış yayınım; demetin momentumu ile ters orantılıdır. Demetin momentumu arttığı sürece yayınım değeri düşecek dolayısıyla demetin fiziksel büyüklüğü de azalacaktır.

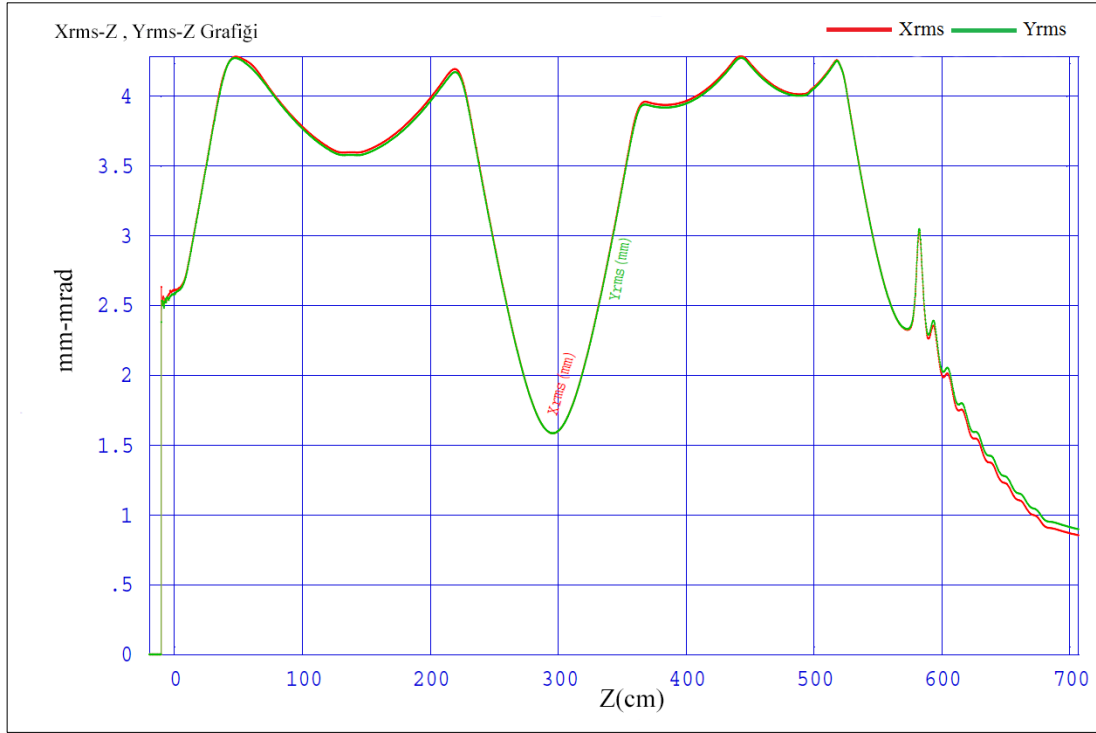
Bu grafikte görüldüğü gibi normalize olmamış $Z-Z_p$ yayını simgeleyen Z_{un} değerinin, demetin ilerleme ekseninde 107 – 166 cm aralığında X_{un} ve Y_{un} ’dan büyük olması, demetin ilerleme ekseninde yayını arttığı ve buna bağlı olarak da fiziksel büyüklüğünün küçüldüğünü göstermektedir. Bu durum, demetin ilerleme ekseninde bu artışın görüldüğü noktada bulunan 260 MHz’lik alt harmonik paketleyicinin etkisi ile gerçekleşmektedir.

Z_{un} için belirgin diğer atmaların görüldüğü ve ilerleme ekseninde 442 – 501 cm arasındaki ilk atmanın bulunduğu bölgede 1.3 GHz’lik FB yerleştirilmişken; belirgin son atmanın görüldüğü 538 – 695 cm aralığında ilk tesla kavite yer almaktadır. Bu noktadaki yayınım büyümesinin yani demetin fiziksel yapısının küçülmesinin nedeni bu cihazların etkileridir.



Şekil 5.5. X_n - Z, Y_n -Z, Z_n -Z grafiği

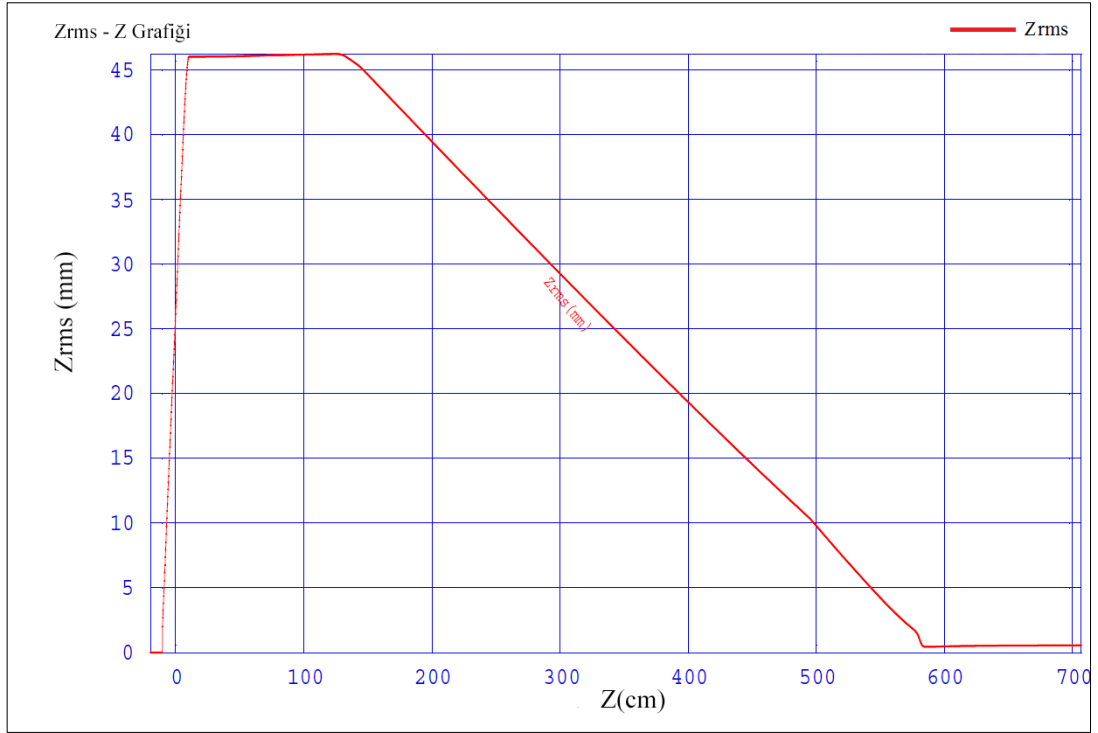
Şekil 5.4'deki $X-X_p$, $Y-Y_p$ ve $Z-Z_p$ eksenleri için normalize olmamış yayınım değerlerini gösteren grafikte olduğu gibi; Şekil 5.5'de gösterilen ve aynı eksenler için normalize olmuş yayınımın şekillendirildiği grafikte ilerleme eksenini üzerinde aynı noktalarda atmalar olduğu görülmektedir. Şekil 5.4'de ve Şekil 5.5'de gösterilen iki grafik arasındaki en önemli fark ise; $Z-Z_p$ eksenlerindeki yayınımın normalize ve normalize olmayan durumlardaki büyüklük farklarıdır. Bunun nedeni; bu yayınımların tanımlarıyla alakalıdır. Normalize yayınım, normalize olmayan yayınımın beta ve gamma Lorentz faktörleri ile çarpımı ile elde ilişkilidir ve demetin momentumu ile doğrudan bir orantı içinde olmayıp, demet enerjisinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmemektedir. Bu nedenle, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de gösterilen grafiklerde, demetin ilerleme eksenini üzerinde SHB'nin bulunduğu noktadaki sayısal büyüklükler farklı olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 5.6. $X_{rms} - Z$ ve $Y_{rms} - Z$ grafiği

Şekil 5.6 ile gösterilen grafikte X_{rms} olarak ifade edilen büyüklük demetin x eksenindeki büyüklüğünü ve Y_{rms} ise benzer şekilde y eksenindeki büyüklüğünü ifade etmektedir. Her iki büyüklükte mm cinsinden tanımlanmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi; elektron tabancasında parçacıkların üretilmesinden itibaren tüm tanımlı demet hattı boyunca x ve y eksenlerinde demetin büyüklüğü eşit olarak artmakta veya azalmaktadır. Bunun nedeni, demet hattı üzerindeki elemanların, demetin boyutunun bir ekseninde değişmesini sağlayacak şekilde tanımlı olmamasındandır. Kuadropoller gibi demeti bir ekseninde şekillendirmek amacıyla kullanılan elemanlar olmadığı için, tanımlı demet hattı elemanları demeti eşit oranda açıp kapatmakta yani büyütüp küçültmektedir. Bu durumdan demetin şekli x ve y eksenlerinde birlikte değişecektir ve benzetim sonucunda beklenen bu durum gözlemlenmiştir.

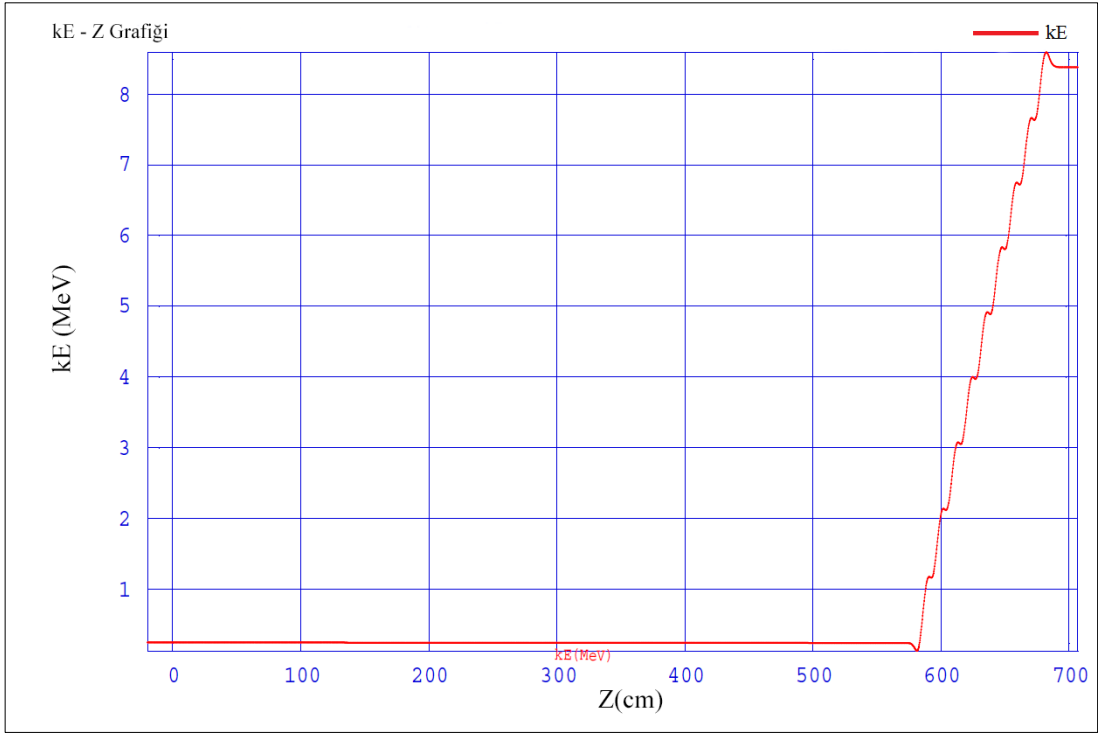
İlerleme ekseni boyunca, demetin z eksenindeki büyüklük yarıçapına ya da bir diğer ifade şekliyle paketçik uzunluğu Şekil 5.7'de gösterilen grafik ile ifade edilir.



Şekil 5.7. Z_{rms} – Z grafığı

Bu grafikte elektron tabancasında üretilen parçacıkların oluşturduğu demetin ilk anda 45 mm uzunluğa kadar ulaştığı ve bir metreye yakın bir mesafe boyunca bu şekilde ilerlediği görülmektedir. Fakat ilerleme ekseninde, 107 – 166 cm arasında konumlandırılmış olan SHB'nin etkisi ile demetin paketçik uzunluğunda sürekli bir azalma görülmektedir. Ayrıca tesla kavitesi bölgesine girmeden önce mm boyutundan daha küçük bir yapıda şekillendiği anlaşılmaktadır. Bu grafikteki ölçünün bu büyüklüğü göstermek için yeterli olmamasından dolayı bu kısım hakkında bu grafik üzerinden yorum yapılamamakta fakat belirtilen bölge içerisinde demetin devam süresinin mikro saniye mertebesinde olduğunun bilinmesi sayesinde grafiğin beklenen sonuçlar ifade ettiği anlaşılmaktadır.

İlerleme ekseninde boyunca demet hattı elemanlarından yalnızca tesla kavitesinin bulunduğu bölgede demete enerji aktarımı yapılabilecektir. Bunun nedeni, diğer demet hattı elemanlarının demeti sadece şekillendirmek ve yapılandırmak için kullanılıyor olmasından ve karakteristik özelliklerinden dolayıdır. Şekil 5.8'de gösterilen grafik bu durumu ifade etmektedir.



Şekil 5.8. Ortalama enerji kE – Z grafiği

Bu grafikte de görüldüğü gibi, tesla kavitesinin ilerleme ekseninde yerleşik olduğu bilinen 538 – 695 cm arasında kalan bölgede demetin ortalama enerjisinde kademeli olarak bir artış gerçekleşmektedir. Bu sayede teorik olarak bilinen tesla kavite bölgelerinde hızlandırmanın olacağı benzetim programı sayesinde de gözlenmiştir.

Yapılan bu benzetim çalışması ile elde edilen verilerden; ifade edilen eksenlerdeki normalize olmayan yayınımları belirten X_{un} , Y_{un} ve Z_{un} ; benzer şekilde ifade edilen eksenlerdeki normalize yayınımları ifade eden X_n , Y_n ve Z_n ; ve demet boyutunu rms olarak ifade eden X_{rms} , Y_{rms} ve Z_{rms} ile ortalama enerji değerini ifade eden kE; demetin ilerleme ekseninde benzetim programı tarafından kullanılan referans parçacığın konumuna göre demet hattında tanımlı olan bazı elemanların başlangıç, orta ve sonuç noktalarında sahip oldukları değerleri içerecek şekilde Çizelge 5.3’de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Demet hattı elemanları benzetim değerleri

	Z (cm)	X _{un} (mm-rad)	Y _{un} (mm-mrad)	Z _{un} (mm-mrad)	X _n (mm-mrad)	Y _n (mm-mrad)	Z _n (mm- mrad)	X _{rms} (mm)	Y _{rms} (mm)	Z _{rms} (mm)	<kE> (MeV)
Elektron Tabancasının Başlangıç Noktası	-19.76266	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.2500005
Elektron Tabancasının Orta Noktası	-10.03162	6.828359	7.842940	0.09201610	7.538373	8.658467	0.101599 0	2.529447	2.534123	2.691025	0.2500029
Elektron Tabancasının Sonu	0.1741343	7.401344	7.307010	1.673277	8.169762	8.065583	1.847172	2.614374	2.581601	26.72465	0.2500051
1. Selenoid Etki Alanı Başlangıcı	41.23470	13.10700	13.14927	5.143498	14.46264	14.50922	5.676583	4.221800	4.219192	46.05622	0.2500121
1. Selenoid Etki Alanı Ortası	48.82974	8.928864	9.070605	4.338623	9.853068	10.00950	4.788278	4.282775	4.272520	46.07299	0.2500130
1. Selenoid Etki Alanı Sonu	56.66215	8.167610	7.878468	4.292170	9.014427	8.694989	4.737123	4.251146	4.229372	46.09496	0.2500139
2. Selenoid Etki Alanı Başlangıcı	222.4038	12.70904	12.49947	23.24752	13.73911	13.52259	39.28358	4.172850	4.152645	37.16058	0.2458255
2. Selenoid Etki Alanı Ortası	292.5732	8.293671	8.226900	19.72224	9.066051	8.998270	31.44309	1.592964	1.594003	30.01707	0.2458162
2. Selenoid Etki Alanı Sonu	362.5059	11.04009	11.02609	15.50140	12.17730	12.16201	22.43071	3.907763	3.889048	23.02044	0.2458186

	Z (cm)	X _{un} (mm-rad)	Y _{un} (mm-mrad)	Z _{un} (mm-mrad)	X _n (mm-mrad)	Y _n (mm-mrad)	Z _n (mm- mrad)	X _{rms} (mm)	Y _{rms} (mm)	Z _{rms} (mm)	<kE> (MeV)
3. Selenoid Etki Alanı Başlangıcı	362.5059	11.04009	11.02609	15.50140	12.17730	12.16201	22.43071	3.907763	3.889048	23.02044	0.2458186
3. Selenoid Etki Alanı Ortası	402.4338	8.750003	8.670708	13.77967	9.553614	9.467617	18.24029	3.975690	3.957939	19.10758	0.2458224
3. Selenoid Etki Alanı Sonu	442.5983	9.390956	9.301971	12.00622	10.21322	10.11598	14.44342	4.285207	4.274862	15.24022	0.2458269
4. Selenoid Etki Alanı Başlangıcı	442.5983	9.390956	9.301971	12.00622	10.21322	10.11598	14.44342	4.285207	4.274862	15.24022	0.2458269
4. Selenoid Etki Alanı Ortası	467.1695	9.144447	9.056318	11.02108	9.926624	9.832628	12.46040	4.085456	4.073106	12.92189	0.2458192
4. Selenoid Etki Alanı Sonu	491.7402	9.181860	9.098402	9.932190	9.973791	9.884714	10.66295	4.015956	4.005406	10.64929	0.2457970
5. Selenoid Etki Alanı Başlangıcı	520.4463	9.500058	9.365788	10.54190	10.19859	10.06338	14.05992	4.220886	4.219913	7.448279	0.2415047
5. Selenoid Etki Alanı Ortası	529.6158	9.682787	9.581201	10.06182	10.41451	10.31847	13.06417	3.808650	3.800940	6.425925	0.2414747
5. Selenoid Etki Alanı Sonu	538.5498	9.699841	9.607386	9.514709	10.46408	10.37636	12.06291	3.342127	3.336273	5.444868	0.2414375

	Z (cm)	X_{un} (mm-rad)	Y_{un} (mm-mrad)	Z_{un} (mm-mrad)	X_n (mm-mrad)	Y_n (mm-mrad)	Z_n (mm- mrad)	X_{rms} (mm)	Y_{rms} (mm)	Z_{rms} (mm)	$\langle kE \rangle$ (MeV)
SHB Girişİ	107.2169	7.712375	7.699949	5.524656	8.511991	8.498246	6.096714	3.722281	3.707668	46.20766	0.2500217
SHB Ortası	136.6412	7.800970	7.785261	263.7413	8.460114	8.444120	276.9044	3.598562	3.579999	45.77839	0.2464142
SHB Çıkışı	166.1736	7.792435	7.773599	25.44691	8.489743	8.470679	45.76696	3.688991	3.667653	42.96341	0.2458234
FB Girişİ	491.7402	9.181860	9.098402	9.932190	9.973791	9.884714	10.66295	4.015956	4.005406	10.64929	0.2457970
FB Ortası	496.6982	9.374954	9.302523	18.86707	10.09656	10.02055	18.10211	4.039321	4.028780	10.15478	0.2429096
FB Çıkışı	501.8715	9.325673	9.239562	11.58094	10.02195	9.930603	16.29440	4.082214	4.071757	9.564054	0.2415394
TESLA Kavite Öncesi	569.3453	9.735202	9.670968	8.053961	10.55039	10.48835	9.327740	2.342221	2.346117	2.328090	0.2412405
TESLA Kavite Ortası	632.6523	1.104291	1.101254	0.9317049	11.06891	11.04448	9.297221	1.423383	1.470829	0.522882	4.642814
TESLA Kavite Çıkışı	695.5858	0.6377097	0.6360288	0.5520161	11.06033	11.03208	9.646507	0.879069	0.923839	0.552606	8.378919

Ülkemizde hızlandırıcı ve dedektör teknolojilerine dayalı Ar-Ge çalışmalarını mümkün kılacak ve ileri düzeyli araştırmaların yapılmasını amaçlayarak önerilmiş ve planlanmış “Türk Hızlandırıcı Merkezi”nin ilk tesisi olarak kurulumu Ankara-Gölbaşı’nda sürmekte olan Serbest Elektron Lazeri ve Bremsstrahlung Tesisi (TARLA) kapsamında tamamlanan bu tez çalışması sonucunda, elektron demet parametrelerinin hesabı yenilenmiş ve demet hattı tasarımı benzetimleri enjektör hattı için kontrol edilmiş ve geliştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında serbest elektron lazerleri ile ilgili gerçekleştirilmiş olan geniş literatür taraması neticesinde sonuçlandırılan bu çalışmanın serbest elektron lazerlerinin çalışma prensibi, tipleri ve özellikleri gibi konularda geniş bir içerik oluşturulmuştur. Ayrıca tez çalışmaları süresince THM TARLA tesisine yerinde ziyaretler ile fiziksel çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır. Tezin içeriğinde TARLA demet hattı ana ve yardımcı donanımlarının çalışma prensipleri ve özellikleri verilmiş ve bu sayede projenin sonraki dönemlerinde yeni üyelerine yazılı bir kaynak bırakması amaçlanmıştır. Ayrıca demet parametrelerinin hesaplanması tamamlanmış ve PARMELA benzetim programı ile enjektör hattının tamamının benzetimi tamamlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Aksoy, A., Karşlı, Ö., Yavaş, Ö., 2007. The Turkish Accelerator Complex IR FEL Project. *Infrared Physics & Technology* (51), 378 – 381.
- Aksoy, A., Yavaş, Ö., Özkorucuklu, S., Lehnert, U., 2009. Injector Design for Turkish Accelerator Center Free Electron Laser Facility. *Proceedings of PAC09*, 3687 – 3689, Canada.
- Aksoy, A., 2013. Özel görüşme.
- Ataser, E., Çakır, O., Çiftçi, A. K., Çiftçi, H., Çiftçi, R., Guliyev, E., Karadeniz, H., Koru, H., Reçepoğlu, E., Sultansoy, S., Sirvanlı, B., Yavaş, Ö., Yılmaz, M., 2004. Türk Hızlandırıcı Merkezi (TAC) Projesi: Yapılanlar ve Yapılması Gerekenler, *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* (8), 261 – 264.
- Aktas, H., Buget, N., Ciftci, A.K., Meric, N., Sultansoy, S., Yavas, O., 1999. New tool for ‘old’ nuclear physics: FEL-Nucleus Colliders. *Nuclear Instruments & Methods*, A428, pp271-275.
- Argonne National Laboratory, 2013. Erişim Tarihi: 31.03.2013. <http://www.aps.anl.gov/epics/sites.php>
- ASTeC, Accelerator Science and Technology Centre, Thompson N., 2013. Introduction to Free-Electron Lasers. Erişim Tarihi: 26.02.2013. http://www.stfc.ac.uk/ASTeC/Resources/PDF/Thompson_FELs.pdf
- Biçer, M., 2012. Süperiletken Linak Elektron Demet Durdurucu Sistemin Araştırılması ve Simülasyonu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 47s, Ankara.
- Billen, J.H., Young, L.M., 2003. Poisson Superfish. Los Alamos National Laboratory report, LA-UR-96-1834.
- Birthmarks.com, 2012. Erişim Tarihi: 20.08.2012. <http://www.birthmarks.com/Index.cfm?Page=92>
- Brau, C.A., 1988. Free-Electron Lasers. *Science, New Series*, 239(4844), 1115-1121.
- Braun, H., Corsini, R., Sultansoy, S., Yavas, O., 2005. CLIC Drive Beam and LHC Based FEL-Nucleus Collider, *Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference*, Knoxville, Tennessee.
- Brinkmann, R., Flöttmann, K., Roßbach, J., Schmüser, P., Walker, N., Weise, H., 2001. TESLA Technical Design Report, PART II: The Accelerator, 380p. Hamburg.
- Chao, A., Tigner, M., 1999. *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*, World Scientific, 650p. Singapore.

- Clarke, J. A., 2004. *The Science and Technology of Undulators and Wigglers*, OUP Oxford, 225p. New York.
- Coupric, M. E., Ortega, J. M., 2000. Free Electron Lasers Sources for Scientific Applications. *Analisis: Luminescence Spectroscopy; Applications and Recent Trends*. 28-8, 725-736.
- Çiftçi, A. K., Sultansoy, S., Yavaş, Ö., Yılmaz, M., 2000. TAC Proposal For Fundamental and Applied Research. 1st Euroasia Conference On Nuclear Science and Its Applications, 1090 – 1096, Izmir.
- Çiftçi, A.K., Çakır, O., Reçepoğlu, E., Sultansoy, S., Yavaş, Ö., Yılmaz, M., 2005. The Status of Turcic Accelerator Complex Proposal. 21. Particle Accelerator Conference (PAC05) Knoxville, Tennessee.
- Damask, J. N., 2004. *Polarization Optics in Telecommunications*, Springer, 221–223, 520 s. New York.
- Dattoli, G., Del Franco, M., Labat, M., Ottaviani, P. L., Pagnutti, S., 2010. Introduction to the Physics of Free Electron Laser and Comparison with Conventional Laser Sources, Varro S., (Ed.), *Free Electron Lasers*, Intech Publishing, 250p. Croatia.
- Dattoli, G., Renieri, A., 1997. *Free Electron Lasers*, Elsevier, 393p. Italy.
- Dattoli, G., Renieri, A., Torre, A., 1993. *Lectures on the Free Electron Laser Theory and Related Topics*, World Scientific, 637p. Singapore.
- Delereu, N., 2009. Particle Sources and Guns, Accelerator Physics Option, Ders Notları, 43s, Erişim Tarihi: 05.03.2012. http://www-pnp.physics.ox.ac.uk/~delerue/accelerator_option/2_sources_and_guns.pdf
- DESY, 2012. Erişim Tarihi: 30.08.2012. https://www.desy.de/research/research_areas/photon_science/light_sources_at_desy/development_of_light_sources/index_eng.html
- Dylla, H. F., Biallas, G., Dillon-Townes, L. A., Feldl, E., Myneni, G. R., Parkinson, J., Preble, J., Siggins, T., Williams, S., Wiseman, M. 1999. Design and Installation of a Low Particulate, Ultrahigh Vacuum System For a High Power Free-Electron Laser, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 17, 2113.
- Edwards, G. S., Allen, S. J., Haglund, R. F., Nemanich, R. J., Redlich, B., Simon, J. D., Yang, W. C., 2005. Applications of free-electron lasers in the biological and material sciences. *Photochemistry and Photobiology*, 81(4), 711-735.
- Edwards, G. S., Austin, R. H., Carroll, F. E., Copeland, M. L., Coupric, M. E., Gabella, W. E., Haglund, R. F., Hooper, B. A., Hutson, M. S., Jansen, E. D., Joos, K. M., Kiehart, D. P., Lindau, I., Miao, J., Pratisto, H. S., Shen, J. H., Tokutake, Y., van der Meer, A. F. G., Xie, A., 2003. Free electron laser

- based biophysical and biomedical instrumentation. Review of Scientific Instruments, 74, 3207.
- Elder, F. R., Gurewitsch, A. M., Langmuir, R. V., Pollock, H. C., 1947. Radiation from Electrons in a Synchrotron, Research Laboratory, General Electric Company, 74 – 72, Schenectady, New York.
- Einstein, A., 1905. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, Annalen der Physik 17 (6), 132–148.
- Freund, H.P. , Antonsen, T.M., 1996. Principles of Free-electron Lasers, Chapman & Hall, 541p, London.
- Gezgin, S. Y., 2009. Serbest Elektron Lazeri Parametrelerinin Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 88s. Isparta.
- Gould, R. Gordon, 1959. The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. In Franken, P.A. and Sands, R.H. (Eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, The University of Michigan, 128p. Ann Arbor.
- Gürtler P., 1997. Annual Reports, Hasylab, Desy, Hamburg.
- Haglund, R. F. Jr., 2006. Applications of Free Electron Lasers in Biological Sciences, Medicine and Material Science. Photon-based Nanoscience and Nanobiotechnology, NATO Science Series, 239, 175-203.
- Herrmannsfeldt, W. B., 1989. Low Emittance Thermionic Electron Guns, SLAC PUB 4843, California.
- Hodgson, N., Weber, H., 2005. Laser Resonators and Beam Propagation, Fundamentals, Advanced Concepts and Applications, Springer, 793p. New York.
- Humphries, S. Jr., 1986. Principles of Charged Particle Acceleration, Wiley, 573p. New York.
- HZDR, 2013. Erişim Tarihi: 25.04.2013. <http://www.hzdr.de>
- HZDR, 2013. Erişim Tarihi: 29.03.2013. <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=972>
- HZDR, 2013. Erişim Tarihi: 20.05.2013. <http://www.hzdr.de/db/Cms?pNid=1534>
- Illinois Üniversitesi, 2012. Erişim Tarihi: 25.08.2012. <http://www.drs.illinois.edu/rss/factsheets/laserhazard.aspx>
- Jacob, J., 2006. New Developments on RF Power Sources, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland.

- JLAB, 2012. Erişim Tarihi: 26.08.2012. <http://education.jlab.org/sitetour/felwiggler.1.html>
- Karlı, Ö., Mete, Ö., Yavaş, Ö., 2005. TAC Test Laboratuvarı Olarak Kıızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri. 23. Ulusal Fizik Kongresi, Bodrum.
- Karlı, Ö., Mete, Ö., Yavaş, Ö., 2005. TAC Test Laboratuvarı Olarak Kıızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri. 23. Ulusal Fizik Kongresi, Bodrum.
- Karlı, Ö., 2006. Hızlandırıcılara Dayalı Kıızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri (IR-FEL) Optimizasyonu. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s. Ankara.
- Karlı, Ö., Aksoy, A., Yavaş, Ö., 2008. A First Step to Turkish Accelerator Center (TAC): An Infrared Free Electron Laser (IR-FEL) Facility, Proceedings of FEL08, 39 - 42, Korea.
- Katsouleas, T. C., 2009. Scientific Assessment of High-Power Free-Electron Laser Technology, National Research Council of the National Academies, The National Academic Press, 54p. Washington.
- Khan, S., 2008. Free-Electron Lasers: Tutorial Review, Journal of Modern Optics, 55-21.
- Koru, H., Ozcan, A., Sultansoy, S., Yavas, O., 2003. Physics potential of the e-RHIC based FEL- nucleus (Th) collider. International Journal of Modern Physics E12, 533-542.
- Koziol, H., 1989. Beam Diagnostics, Turner S. (Ed), CAS CERN Accelerator School, Third General Accelerator Physics Course, 241p. Geneva.
- Lannen, P. M., 1997. The Lorentz Transformations, a Detailed Derivation, San Diego State University, 344p. California.
- Linearcollider, 2013. Erişim Tarihi: 28.03.2013. <http://newslines.linearcollider.org/2012/03/29/>
- Luchini, P., Motz, H., 1990. Undulators and Free-Electron Lasers, Oxford University Press, 322p. New York.
- Maiman, T.H., 1960. Stimulated Optical Radiation in Ruby. Nature, 187 4736, 493-494.
- Marshall, T. C., 1985. Free-Electron Lasers, Macmillan Pub. Co., 191p. New York.
- Mete, Ö., 2006. Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynaklarının Fiziksel Karakteristikleri. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 136s. Ankara.

- Neil, G. R., Carr, G. L., Gubeli, J. F., Jordan, K., Martin, M. C., McKinney, W. R., Shinn, M., Tani, M., Williams, G. P., Zhang, X. C., 2003. Production of High Power Femtosecond Terahertz Radiation. *Nuclear Instruments and Methods*, 507, 537–540.
- New Hampshire Materials Laboratory, 2012. Erişim Tarihi: 14.09.2012. <http://www.nhml.com/scanning-electron-microscopes-sem.cfm>
- Nguyen, D. C., Russell, S., Moody, N., 2009. *Free Electron Lasers – Theory and Practice*, USPAS 2009, Los Alamos National Laboratory, New Mexico.
- Oh-e, M., Lvovsky, I., Wei, X., Shen, Y. R., 2000. Sum-Frequency Generation (SFG) Vibrational Spectroscopy of Side Alkyl Chain Structures of Polyimide Surfaces. *Journal of Chemical Physics*, 113, 8827-8832.
- Onuki, H., Elleaum, P., 2004. *Undulators, Wigglers and Their Applications*, Taylor & Francis, 456p. New York.
- Ortega, J. M., 1990. *Optical Cavities for Free Electron Lasers*, Turner S. (Ed), CAS CERN Accelerator School, Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Geneva.
- O'Shea, P.G., Freund, H.P., 2001. Free-Electron Lasers; Status and Applications. *Science*. 8;292(5523):1853-8.
- Özkorucuklu, S., Yavaş, Ö., Çakır, O., Çiftçi, A.K., Çiftçi, R., Aksoy, A., Ketenoğlu, B., Zengin, K., Akkus, B., Arıkan, P., Yıldız, H. D., Sahin, L., 2010. The Status of Turkish Accelerator Center Project. *Proceedings of IPAC'10*, 4419 – 4421, Japonya.
- Özkorucuklu, S., 2011. VII. Parçacık Hızlandırıcıları ve Dedektörleri Yaz Okulu, Ders Sunum Notları, Bodrum.
- Özkorucuklu, S., Aksoy, A., 2011. *The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA-TDR)*, 148s. Ankara.
- Özkorucuklu, S., 2013. Özel görüşme.
- Prazeres, R., Ortega J. M., Glotin, F., Jaroszynski, D. A., Marcouillé, O., 1997. Observation of Self-Amplified Spontaneous Emission in the Mid-Infrared in a Free Electron Laser, *Physical Review Letters*, 78-11, 2124-2127.
- Renk, K.F., 2012. *Basics of Laser Physics*, Springer, 620p. Heidelberg, Berlin.
- RI, 2013. Erişim Tarihi: 25.04.2013. <http://www.research-instruments.com>
- Saldin, E. L., Schneidmiller E. A., Yurkov, M. V., 2000. *The Physics of Free Electron Lasers*, Springer, 457p. Heidelberg.

- Scott, D., 2012. Progress on Helical Undulator for the Production of Polarised Positrons, Daresbury Lab. Meeting Presentations. Erişim Tarihi: 28.08.2012. <http://tesla.desy.de/tesla-apdg/>
- Serway, R. A., 1990. Physics for Scientist & Engineers, Saunders College, 1250p. Philadelphia.
- Sharma, S. K., Helsley, C. E., Burke, R. J., Tratt, D. M., Collins, R. L., Patel, C. K. N., 1997.
- Ship-based Free Electron Laser (FEL) Lidar for Oceanic and Atmospheric Research. In N. K. Saxena (Ed.) Recent Advances in Marine Science and Technology, 191-204, Honolulu.
- Siegman, A. E., 1986. Lasers, University Science Books, 1283p. Sausalito, California.
- SLAC, 2012. Erişim Tarihi: 26.08.2012. <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/images/undu2.jpg>
- SLAC, 2013. Erişim Tarihi: 28.02.2013. <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/glossary.html>
- Sultansoy, S., 2005. Türk Hızlandırıcı Kompleksinin Genel Tasarımı, PDT2002K-120250 Proje Raporu, 250s. Ankara.
- Svelto, O., 2010. Principles of Lasers, Springer, 622p. Milano.
- THM Dökümantasyon Sistemi, Erişim Tarihi: 20.06.2013. <http://tarla-fel.org>
- THM, Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi web sitesi, 2013. Erişim Tarihi: 18.06.2013. <http://thm.ankara.edu.tr/>
- Turner S. (Ed), 1999. CAS CERN Acelerator School, Vacuum Technology, 326p. Geneva.
- University of Oregon. Erişim Tarihi: 28.02.2013. <http://zebu.uoregon.edu/~imamura/122/images/electromagnetic-spectrum.jpg>
- Yavaş, Ö., 2000. Parçacık Hızlandırıcıları: Türkiye’de Neler Yapılmalı, DPT1997K-120420 Proje Raporu, 130s. Ankara.
- Yavaş, Ö., 2001. Turkiye Accelerator Center (TAC) Proposal. 1st Hellenic – Turkish International Physics Conference, pp 131, Bodrum.
- Yavaş, Ö., 2001. 4. Nesil Işınım Kaynakları Olarak Serbest Elektron Lazerleri. I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, Ankara.
- Yavaş, Ö., 2002. Serbest Elektron Lazeri Üretiminde Parametre Optimizasyonu. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi (14), 139 – 144.

- Yavaş, Ö., 2004. Türk Hızlandırıcı Kompleksi Projesi. II. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, Ankara.
- Yavaş, Ö., 2004. Türk Hızlandırıcı Kompleksi Projesinin Genel Tasarımı. 22. Ulusal Fizik Kongresi, Bodrum.
- Yavaş, Ö., 2005. Sinkrotron Işınımı ve Serbest Elektron Lazeri Üretimi ve Kullanımı İçin Genel Tasarım, DPT2003K-120190 Proje Raporu, 130s. Ankara.
- Yavaş, Ö., 2005. Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi: Geçilen ve Kalan Yolun Haritası. 23. Ulusal Fizik Kongresi, Bodrum.
- Yiğit, Ş., 2007. Türk Hızlandırıcı Kompleksi Projesi Kapsamında SASE ve Osilatör Modda Serbest Elektron Lazerinin Genel Tasarımı, 125 s. Ankara.
- Young, L.M., Billen, J.H., 2003. The Particle Tracking Code Parmela, Proceedings of the 2003 Particle Acceleration Conference. Portland, Oregon.
- Young, L.M., 2004. Parmela, Los Alamos National Laboratory report, LA-UR-96-1835, 115p. California.
- Wangler, T. P., 2008. RF Linear Accelerators, Wiley, 433p. Weinheim.
- Wayforlight, 2012. Erişim Tarihi: 28.05.2012. <http://www.wayforlight.eu/eng/home.aspx>
- Wiedemann, H., 1993. Particle Accelerator Physics. Springer, 441p. Heidelberg, Berlin.
- Wikimedia Foundation, 2012. Erişim Tarihi: 26.08.2012. <http://wikimediafoundation.org/wiki/File:Undulator.png>
- Wikipedia, 2012. Erişim Tarihi: 25.08.2012. http://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum
- Wikipedia, 2012. Erişim Tarihi: 25.08.2012. http://en.wikipedia.org/wiki/File:Commercial_laser_lines.svg
- Wikipedia, 2012. Erişim Tarihi: 25.08.2012. http://en.wikipedia.org/wiki/File:FEL_principle.png
- Wikipedia, 2013. Erişim Tarihi: 29.03.2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/File:GaussianBeamWaist.svg>
- Wikipedia, 2013. Erişim Tarihi: 29.03.2013. <http://en.wikipedia.org/wiki/Outgassing>
- Wille, K., 1996. The Physics of Particle Accelerators ; An Introduction, Oxford University Press, 315p. New York.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mert ŞEKERCİ
Doğum Yeri ve Yılı : Mersin, 1987
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mertsekerci@sdu.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Pakize Kokulu Y.D.A. Lise, 2004
Lisans : Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü

Mesleki Deneyim

SDU Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi 2010 - (halen)

Yayımları

- Biçer M., Şekerci M., Ceylan S., Özkorucuklu S., Arıkan P., 2012. Simple Geo ile THM TARLA Tesisi için Elektron Dump Sistemi Geometrisi Tasarımı. Adım Fizik Günleri – II, Denizli.
- Ceylan S., Şekerci M., Altuğ H., Özkorucuklu S., 2012. Türk Hızlandırıcı Merkezi Serbest Elektron Lazeri İçin Elektron Demet Diagnostik Sistemi Çalışması. Türk Fizik Derneği 29. Uluslararası Fizik Kongresi, Bodrum.
- Kayaalp K., Şekerci M., Kalaycı A.G., Ceylan S., Özkorucuklu S., 2012. THM TARLA Tesisi için Radyasyon Güvenliği. Adım Fizik Günleri – II, Denizli.
- Şekerci M., Özkorucuklu S., 2012. Status of TARLA, Sarajevo School of High Energy Physics 2012, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
- Kalaycı A.G., Şekerci M., 2013. Yüksek Güvenlikli Modüler Makine Güvenlik Kilidi Sistemi Donanımı İçin Cross Platform Özellikli Firemonkey Tabanlı Kontrol Yazılımının Geliştirilmesi Ve Uygulanması. Akademik Bilişim 2013, Antalya.
- Şekerci, M., Özkorucuklu, S., 2013. Yüksek Çözünürlüklü Elektron Spektrometresi için Sintilatör Ekran Konumlandırması, SDU Fen Dergisi (E-Dergi). Sayı 8, Cilt 1, 60-70, 2013.